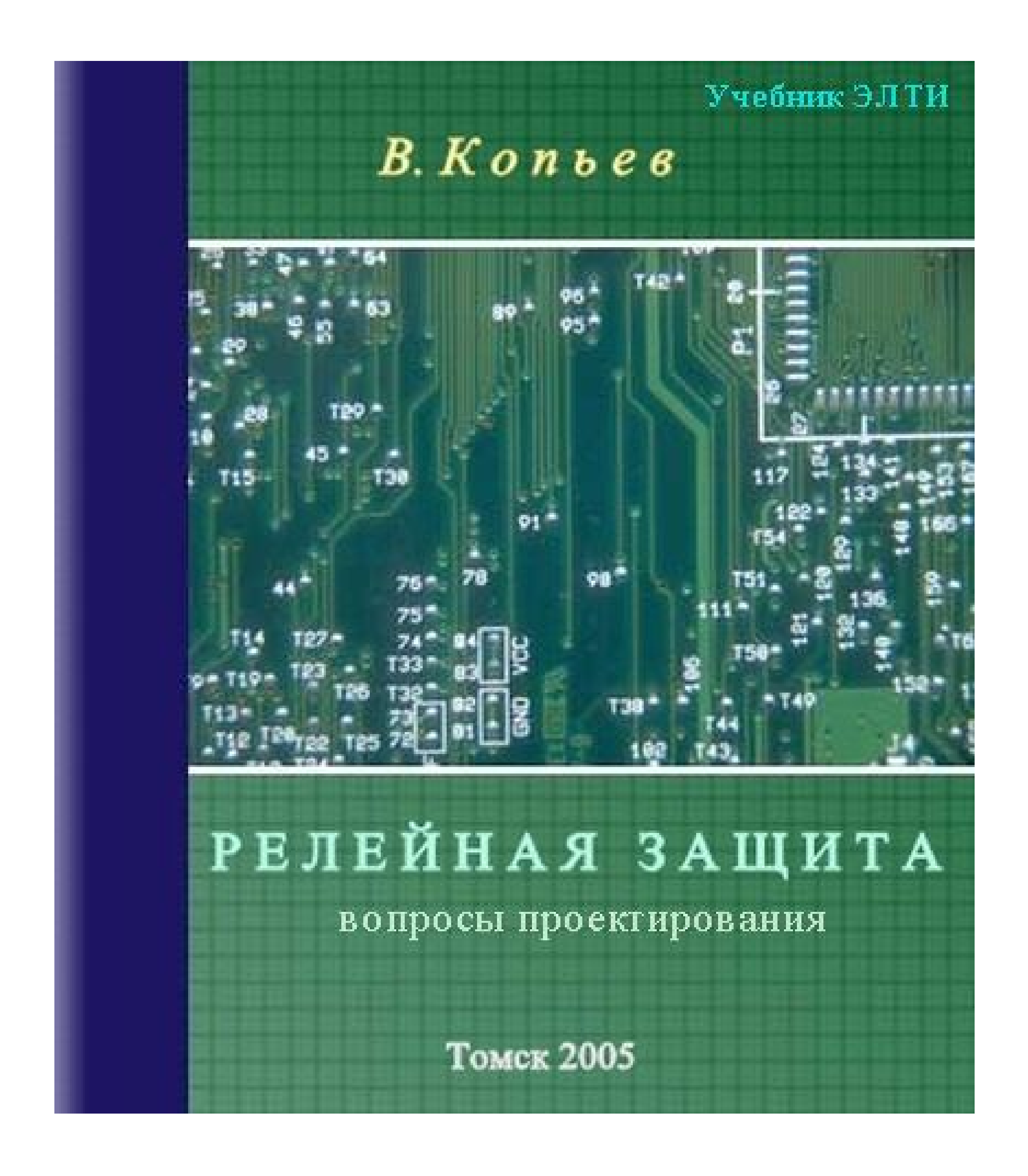

Учебник ЭЛТИ
В. Копьев
РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА
вопросы проектирования
Томск 2005

Федеральное агентство по образованию
Томский политехнический университет
Электротехнический институт

В. Н. КОПЬЕВ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

вопросы проектирования

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Томск 2005

УДК 621.316.925

КОПЬЕВ В.Н. Релейная защита основного электрооборудовании электростанций и подстанций. Вопросы проектирования: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп.– Томск: Изд. ЭЛТИ ТПУ, 2005. - 107с.

В пособии приведены сведения по проектированию устройств релейной защиты основного электрооборудования электростанций и подстанций: генераторов, трансформаторов и автотрансформатороâ, электродвигателей, шин Материал изложен в доступной форме, снабжен примерами расчета и структурными схемами.

Пособие подготовлено на кафедре электрических станций электротехнического института ТПУ и ориентировано на студентов электроэнергетических специальностей.

Публикуется по постановлению учебно-методического отдела ЭЛТИ

Содержание

1

Введение

1.1 ПРИНИМАЕМЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

При проектировании любой системы электроснабжения приходится считаться с возможностью возникновения повреждения или ненормального режима в энергоустановке. Непринятие мер для их устранения может привести к тяжелым экономическим или техническим последствиям. Функции ликвидации различного рода аварий или устранение анормальных режимов возлагаются на релейную защиту. Правильно выбранная и рассчитанная защита должна удовлетворять нормативным материалам в части обеспечения требований селективности, быстродействия и чувствительности.

Для анализа поведения релейной защиты при повреждениях необходимо знать параметры аварийного режима, которые могут быть рассчитаны с принятием следующих основных допущений [1]:

а) схемы отдельных последовательностей приводятся к одной ступени напряжения при средних значениях коэффициентов трансформации силовых трансформаторов. Точные коэффициенты трансформации при наличии трансформаторов и автотрансформаторов с широким диапазоном встроенного регулирования для оценки чувствительности и выполнения согласования;

б) не учитываются активные сопротивления схем отдельных последовательностей, за исключением линий электропередач, для которых отношение активных и реактивных сопротивлений $R_Л / X_Л \geq 0{,}3\text{-}0{,}4$;

в) не учитываются поперечные емкости линий электропередач длиной 200-250 км напряжением 110-220 кВ и длиной до 150 км напряжением 330-750 кВ;

г) принимается, как правило, равенство сопротивлений в схемах прямой и обратной последовательностей;

д) при проектировании релейной защиты подстанций напряжением (110-750) кВ и линий электропередач напряжением (110-220) кВ допустимо ограничиваться вычислением только аварийных составляющих.

1.2 РАСЧЕТ ТОКОВ ТРЕХФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Для выполнения расчета рекомендуется следующий порядок:

1. Составляется схема замещения, сопротивления отдельных элементов которой для целей релейной защиты рассчитываются в именованных единицах.

2. Для расчета сопротивлений элементов схемы замещения в именованных единицах можно воспользоваться следующими выражениями:

- энергосистема $x = U_Б^2 / S_К$; $x = x_{*C} \dfrac{U_Б^2}{S_{НОМ}}$;

$$x = \frac{U_Б^2}{\sqrt{3} I_{НОМ.ОТК} U_{СР}};$$

- генератор $x = x_{d*} \dfrac{U_Б^2}{S_{НОМ}}$;

- трансформатор двухобмоточный $x = \dfrac{u_К\%}{100} \dfrac{U_Б^2}{S_{НОМ}}$;

- трансформатор трехобмоточный, автотрансформатор

$$x_{ТВ}\% = 0,5(u_{kВ-Н}\% + u_{kВ-С}\% - u_{kС-Н}\%);$$

$$x_{ТС}\% = 0,5(u_{kВ-С}\% + u_{kС-Н}\% - u_{kВ-Н}\%);$$

$$x_{ТН}\% = 0,5(u_{kВ-Н}\% + u_{kС-Н}\% - u_{kВ-С}\%);$$

- линия $x = x_{уд} l \dfrac{U_Б^2}{U_{СР}^2}$;

- реактор $x = x_Р \dfrac{U_Б^2}{U_{СР}^2}$,

где $S_{НОМ}$ - номинальная мощность элементов (генератора, трансформатора, энергосистемы), *МВА*; $S_К$ - мощность короткого замыкания энергосистемы, *МВА*; $I_{НОМ.ОТК}$ - номинальный ток отключения выключателя, *кА*; x_{*C} - относительное номинальное сопротивление энергосистемы; $u_К$ - напряжение короткого замыкания трансформатора; $U_{СР}$ - среднее напряжение в месте установки данного элемента, *кВ;* $x_{уд}$ - удельное сопротивление на *1 км* длины, *Ом/км*; l - длина линии, км; $x_Р$ - сопротивление реактора, *Ом;* $U_Б$ - базисное напряжение, *кВ.*

3. Схема сворачивается относительно точки короткого замыкания.

4. Определяется результирующий ток трехфазного короткого замыкания по выражению $I_К^3 = \dfrac{U_Б}{\sqrt{3} x_{РЕЗ}}$,

где $x_{РЕЗ}$ - результирующее сопротивление схемы замещения относительно точки короткого замыкания, *Ом;* I_K^3 - ток трехфазного короткого замыкания, кА.

5. Найденный ток распределяется по элементам схемы замещения.

1.3 РАСЧЕТ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Для расчета токов обратной и нулевой последовательности при несимметричных повреждениях наиболее удобен метод наложения. Метод сводится к условному представлению действующего режима короткого замыкания в виде двух режимов: предшествующего нагрузочного режима и последующего аварийного, то есть считается:

в месте короткого замыкания приложены два взаимоисключающих напряжения - $\pm U_K^H$, равных напряжению предшествующего нагрузочного режима. Применительно к несимметричному к.з. напряжения $\pm U_K^H$ должны быть приложены к точке K' фиктивного к.з., отдаленного на сопротивление ΔZ от действительного места короткого замыкания. Приложенное напряжение $-U_K^H$ обеспечивает условия аварийного режима.

Действующие токи и напряжения режима короткого замыкания определяются из следующего:

1. В схемах обратной и нулевой последовательностей токи и напряжения в месте короткого замыкания и на других участках равны параметрам аварийного режима.
2. В схеме прямой последовательности токи в месте короткого замыкания равны аварийным токам, а напряжения в месте к.з. и напряжения и токи на других участках в этой схеме получаются параметров обоих режимов.

Соотношения для токов и напряжений отдельных последовательностей для несимметричных к.з. при использовании принципа наложения даны в Табл.1.

Алгоритм расчета токов несимметричного к.з. можно представить в следующем виде:

1. Составляются схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.
2. Схемы замещения эквивалентируются относительно точки к.з.
3. Определяются токи в месте повреждения.
4. Найденное значение токов распределяется по схемам замещения.

Таблица 1

Вид к.з.	Соотношения	
	для токов	для напряжений
Замыкание между фазами B и C $Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma}$	$I_{1K} = -I_{2K} = \dfrac{U_K^H}{2Z_{1\Sigma}}$	$U_{1K}^{(ав)} = -U_{2K} = -\dfrac{U_K^H}{2}$
Замыкание на землю фазы A	$I_{1K} = I_{2K} = I_{0K} = \dfrac{U_K^H}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}$	$U_K^H = -(U_{1K}^{(ав)} + U_{2K} + U_{0K})$
Замыкание на землю фаз B и C	$I_{1K} = -(I_{2K} + I_{0K}) = \dfrac{U_K^H}{Z_{1\Sigma} + \dfrac{Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}}$	$U_K^H + U_{1K} = U_{2K} = U_{0K}$
Обозначения	$Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$ - результирующие сопротивления схем прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно точки к.з.; I_{1K}, I_{2K}, I_{0K} - токи прямой, обратной и нулевой последовательностей; U_{1K}, U_{2K}, U_{0K} - напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей; U_K^H - напряжение предшествующего нагрузочного режима в месте к.з.; $U_{1K}^{(ав)}$ - напряжение прямой последовательности аварийного режима.	

Подпитывающий эффект фактической нагрузки при ручном расчете токов к.з. может быть приближенно учтен влиянием обобщенной нагрузки [2]:

$$E''_{*нагр} = 0,85; \quad x''_{*нагр} = 0,35.$$

При участии в обобщенной нагрузке синхронных двигателей $E''_{*нагр}$ должна приниматься несколько больше

$$E''_{*нагр} = 0,9 - 1.$$

При массовых расчетах токов коротких замыканий для целей релейной защиты (в особенности при несимметричных к.з.) влияние подпитки от нагрузки можно не учитывать, а использовать как дополнительный уточняющий фактор.

2

Защита генераторов

2.1 ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И НЕНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ

Синхронные генераторы относятся к наиболее ответственному оборудованию, работающему в режиме интенсивных электрических и механических нагрузок. Их выход из работы может привести к возникновению системной аварии, поэтому устройства релейной защиты должны в полном объеме обеспечивать требования быстродействия, селективности, чувствительности и надежности.

2.1.1 Повреждения генераторов

Витковые замыкания являются опасным видом повреждения и характеризуются протеканием больших токов в замкнувшихся витках при незначительном изменении тока в неповрежденной части обмотки.

Замыкания на землю наиболее часто возникающий режим повреждения. В месте замыкания на землю возникает дуга, которая может привести к значительным разрушениям стали статора. В соответствии с последними нормативными материалами генераторы любой мощности при замыкании на землю обмотки статора должны отключаться.

Многофазные к. з. Достаточно частой причиной их возникновения являются однофазные замыкания из-за нарушения изоляции в лобовых частях обмотки. Возникающие токи могут привести к значительным разрушениям генератора, поэтому требуют немедленного отключения.

Повреждения обмотки ротора. Обмотки ротора генератора находятся под невысоким напряжением (300 - 500) В, поэтому их изоляция обладает значительным запасом прочности. Однако из-за тяжелых механических условий работы относительно часто возникают замыкания на землю в одной или двух точках. Замыкания на землю в одной точке ротора не влияет на работу генератора, но при возникновении замыкания в другой точке возбуждения часть обмотки ротора шунтируется. Искажение магнитного поля машины приводит к возникновению вибрации и разрушению подшипников и уплотнений вала генератора, обгоранию изоляции и оплавлению меди обмотки.

2.1.2 Анормальные режимы работы

Внешние к. з. должны ликвидироваться защитами смежных присоединений. Однако, в случае отказа защиты или выключателя этого элемента ток короткого замыкания должен быть отключен защитой генератора.

Перегрузки генератора возникают в результате отключения или отделения части параллельно работающих генераторов, при работе форсировки возбуждения, самозапуске двигателей, потере возбуждения и т. п. Перегрузки вызывают перегрев обмоток, старение изоляции и, как следствие, ее повреждение. При возникновении перегрузки защита должна действовать на сигнал и только в тех случаях, когда разгрузка генераторов не дает результатов, по истечении допустимого времени генераторы должны отключаться.

Несимметрия фазных токов возникает при внешних однофазных и двухфазных замыканиях, при большой несимметричной нагрузке близких потребителей, при неполнофазных режимах работы энергосистемы. Несимметрия сопровождается появлением в обмотке статора токов обратной последовательности. При этом в роторе возникают токи двойной частоты, вызывающие его повышенный нагрев и вибрацию вращающихся частей машины.

*Повышение напряжения*_ возникает в результате неисправности системы возбуждения. Защита обязательна к установке на гидрогенераторах и турбогенераторах мощностью 160 мВт и более.

Асинхронный режим возникает при потере возбуждения и в результате нарушения устойчивости и сопровождается потреблением из сети значительного реактивного тока, понижением напряжения на зажимах генератора, увеличением оборотов ротора, возникновением местных перегревов ротора и повышенным нагревом крайних пакетов статора. Из-за повышенных значений тока статора работа генератора в асинхронном режиме ограничивается по времени. Для турбогенераторов мощностью (63-500) МВт длительность асинхронного режима допускается до 15 минут, для турбогенераторов мощностью 800 МВт и более асинхронный режим недопустим.

2.2 ВЫБОР И РАСЧЕТ ЗАЩИТ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ И ВИТКОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Для защиты от внутренних повреждений применяют продольную и поперечные дифференциальные защиты.

2.2.1 Поперечная дифференциальная защита

Поперечная дифференциальная защита ставится на генераторах, обмотки статора которых содержат две параллельные ветви, и предназначена для защиты от витковых замыканий. Защита выполняется односистемной на реле типа РТ- 40/Ф с фильтром высших гармоник. Это реле присоединяется к трансформаторам тока с коэффициентом трансформации от 1500/5 до 2500/5, врезанному в перемычку между нейтралями параллельных обмоток статора. Первичный ток срабатывания при проектировании принимается равным $0,2I_{НОМ}$ генератора. При наладке по результатам испытаний ток срабатывания может быть существенно уменьшен.

Ликвидация витковых замыканий в обмотке статора, не имеющей параллельных ветвей, возлагается на защиту от замыканий на землю.

2.2.2 Продольная дифференциальная защита

Защита выполняется в трехфазном трехрелейном исполнении для генераторов мощностью до 100 мВт включительно на реле типа РНТ-565, на генераторах большей мощности - на реле типа ДЗТ -11/ 5.

А) Расчет дифференциальной защиты на реле типа РНТ-565

Ток срабатывания защиты отстраивается от тока небаланса при внешнем к.з. или при асинхронном ходе

$$I_{СЗ} = k_Н I_{НБ\ РАСЧ} \qquad (1)$$

где $k_Н$ - коэффициент надежности, принимается равным *1,2*;

$I_{НБ\ РАСЧ} = k_{ОДН} f_i I'_{МАКС}$ - расчетный ток небаланса;

$k_{ОДН} = 0,5$ - коэффициент однотипности при однотипных трансформаторах тока;

$k_{ОДН} = 1$ - коэффициент однотипности при разнотипных трансформаторах тока;

$f_i = 0,1$ - допустимая десятипроцентная погрешность трансформаторов тока;

$I'_{МАКС}$ - периодическая составляющая тока трехфазного к.з. на выводах генератора или наибольшее значение тока асинхронного хода.

Требуемое число витков определяется по выражению

$$w_{РАСЧ} = \frac{F_{СР} n_{ТТ}}{I_{СЗ}}, \qquad (2)$$

где $F_{СР} = 100\ А$ - магнитодвижущая сила срабатывания реле;

$n_{ТТ}$ - коэффициент трансформации трансформаторов тока.

Расчетное число витков округляется до ближайшего меньшего значения. Обычно полученное значение тока срабатывания составляет $(0,5 - 0,6)I_{НОМ}$.

Коэффициент чувствительности проверяется по току двухфазного к.з. в минимальном режиме работы генератора

$$k_ч = \frac{I_К^{(2)}}{I_{СЗ}} \geq 2 \qquad (3)$$

Расчетный ток к.з. $I_К^{(2)}$ определяется для двух режимов: повреждение одиночно работающего генератора, когда ток повреждения протекает только от генератора и повреждение генератора, включаемого методом самосинхронизации, когда ток к месту к.з. подходит только от сети.

Б) Расчет дифференциальной защиты на реле типа ДЗТ – 11

Защита с торможением устанавливается на турбогенераторах мощностью более 100 МВт. Трансформаторы тока со стороны линейных выводов включаются на полный ток, а со стороны нейтрали или на полный ток, или при наличии параллельных ветвей на его половину. При включении трансформаторов тока на половину тока их коэффициенты трансформации должны быть в два раза меньше коэффициентов трансформации трансформаторов тока, установленных со стороны линейных выводов. Тормозная обмотка включается к трансформаторам тока со стороны линейных выводов генератора. Расчет защиты заключается в выборе тока срабатывания и расчете числа витков тормозной обмотки.

Ток срабатывания защиты при отсутствии торможения, приведенный к вторичным цепям

$$I_{СР} = \frac{F_{СР}}{w_Р} \qquad (4)$$

где $F_{СР} = 100А$ - м.д.с. срабатывания реле *ДЗТ - 11*;

$w_Р = 144$ - число витков рабочей обмотки.

Необходимое число витков тормозной обмотки

$$w_{Т\ РАСЧ} = \frac{k_Н I_{НБ\ РАСЧ} w_Р}{I_Т tg\alpha}, \qquad (5)$$

где $k_Н = 1,6$ - коэффициент надежности;

$I_{НБ\ РАСЧ} = k_{ОДН} f_i I'$ - значение тока небаланса при внешнем к.з. или асинхронном ходе;

$I_Т$ - тормозной ток (равен I');

f_i - допустимая погрешность трансформаторов тока;

$k_{ОДН} = (0,5 - 1)$ - коэффициент однотипности трансформаторов тока;

$tg\alpha = 0,75.$

После несложного преобразования выражение (5) примет вид:

$$w_{Т\ РАСЧ} = \frac{k_Н k_{ОДН} f_i w_Р}{tg\alpha}. \tag{6}$$

Принимается ближайшее большее число витков.

Чувствительность защиты высокая и при выборе уставок, как правило, не проверяется.

В) Расчет дифференциальной защиты микропроцессорного исполнения

В настоящее время микропроцессорные комплексы для защиты генераторов или блоков генератор-трансформатор в основном выпускаются двумя ведущими отечественными фирмами «АВВ-Чебоксары» и «ЭКРА».

Микропроцессорный комплекс, изготавливаемый НПП «ЭКРА», может состоять как из двух шкафов типа ШЭ 1111 и ШЭ 1112, так и из одного шкафа ШЭ 1113. Исполнение выбирается предприятием-изготовителем по согласованию с заказчиком и определяется количеством входных и выходных цепей, а также составом защит.

Расчет дифференциальной защиты, входящей в состав комплекса, заключается в расчете начального тока срабатывания, определении точки излома характеристики срабатывания, нахождении значения коэффициента торможения, выборе тока срабатывания дифференциальной отсечки.

1.Начальный ток срабатывания $I_{СР.0}$ выбирается из условия отстройки от тока небаланса, протекающего через защиту, в номинальном режиме

$$I_{СР.0} \geq k_Н I_{НБ.НОМ}, \tag{7}$$

где $k_Н = 2,0$ - коэффициент надежности;

$I_{НБ.НОМ} = f_i k_{ОДН} I_{НОМ}$ - ток небаланса;

$f_i = 0,1$ - допустимая относительная погрешность трансформаторов тока;

$k_{ОДН} = 0,5$ - коэффициент однотипности;

$I_{НОМ}$ - номинальный ток генератора.

Регулируемый диапазон уставок $I_{СР.0}$ от $0,1I_{НОМ}$ до $0,8I_{НОМ}$.

2. Определяется точка излома B характеристики срабатывания исходя из обеспечения требований чувствительности к токам короткого замыкания в рабочей зоне. Типичное значение уставки $B = 1,5$.

3. Величина коэффициента торможения K_T выбирается с учетом отстройки защиты от токов небаланса, вызванных внешними к.з. или асинхронным ходом:

$$K_T > \frac{k_H I_{НБ.КЗ}}{I_T} \quad (8)$$

где $k_H = 2,0$ - коэффициент надежности;

$I_{НБ.КЗ} = k_A f_i k_{ОДН} I_{МАКС}$ - ток небаланса;

$k_A = 2$ - коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей тока;

$f_i = 0,1$ - относительная погрешность трансформаторов тока;

$k_{ОДН} = 0,5$ - коэффициент однотипности трансформаторов тока;

$I_{МАКС}$ - максимальный ток через трансформаторы тока при внешнем коротком замыкании или асинхронном ходе;

$I_T = \sqrt{I_1 I_2 cos\alpha}$ - ток торможения;

I_1 - амплитуда тока на нулевых выводах генератора;

I_2 - амплитуда тока на линейных выводах генератора;

α - угол между векторами токов со стороны линейных и нулевых выводов генератора.

Диапазон уставок K_T может быть установлен от 0,3 до 0,7. Типичное значение $K_T = 0,5$. Более высокие значения коэффициента торможения принимается в случае резко различных условий работы трансформаторов тока.

4. Дифференциальная токовая отсечка обеспечивает быстрое и надежное срабатывание защиты при внутренних к.з., когда возможно насыщение трансформаторов тока с увеличением полной погрешности до 50%.

Уставка отсечки может быть установлена в пределах от $6I_{НОМ}$ до $12I_{НОМ}$.

5. При наладке может быть выполнена амплитудная коррекция вторичных токов для получения минимального небаланса дифференциального тока.

2.3 ВЫБОР И РАСЧЕТ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

Выбор типа защиты генератора от замыканий на землю зависит от режима его работы. При работе генератора на сборные шины защита выполняется на принципе контроля емкостного тока присоединения или на принципе наложения на цепь статора переменного тока, при работе генератора в режиме блока защиты могут выполняться с использованием напряжений нулевой последовательности, на принципе наложения на цепь статора постоянного тока или переменного тока, имеющего частоту отличную от промышленной.

2.3.1 Защита от замыканий на землю обмотки статора генератора, реагирующая на емкостный ток

Защита выполняется на трансформаторе тока нулевой последовательности с подмагничиванием типа ТНПШ. Подмагничивание смещает рабочую область индукции из начальной части характеристики намагничивания на крутой, практически прямолинейный участок. Схема включения защиты для генераторов ТВФ-63 приведена на Рис.1.

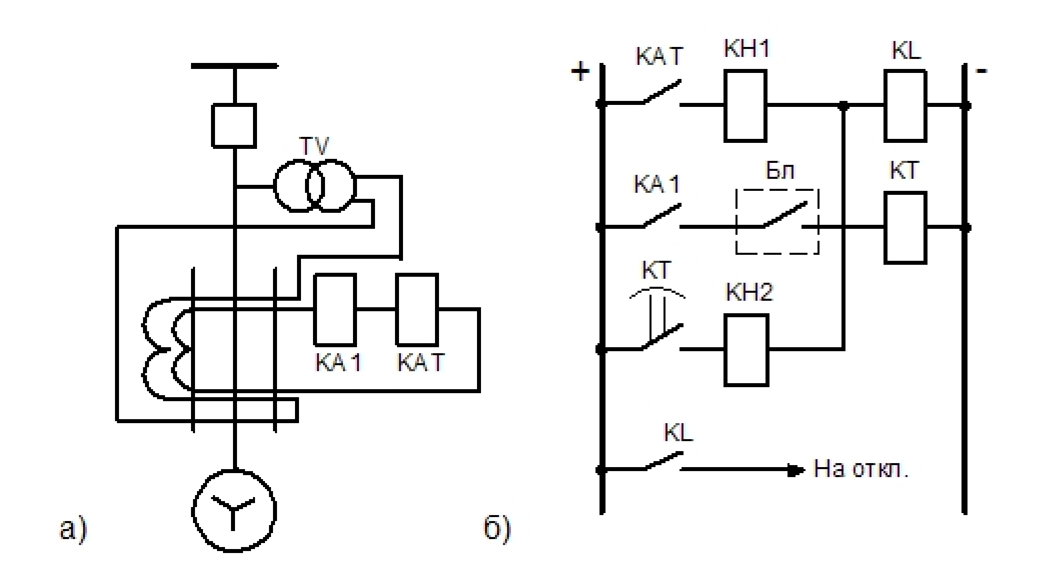


Рис.1 *Схема защиты генератора от замыканий на землю*
а) токовые цепи; б) цепи оперативного постоянного тока

Во вторичную цепь ТНПШ включены токовое реле ***КА1*** типа РТЗ-51 для защиты генератора от однофазных замыканий на землю и реле ***КАТ*** типа РНТ-565 для защиты от двойных замыканий на землю. Для предотвращения излишних срабатываний реле ***КА1*** при внешних междуфазных

замыканий вводится блокировка ***Бл*** защитами от внешних симметричных и несимметричных замыканий.

Ток срабатывания реле ***КА1*** защиты от замыканий на землю обмотки статора должен удовлетворять следующим условиям:

а) быть не выше 5 А;

б) быть больше тока небаланса, проходящего через ТНП при внешнем двухфазном к.з.

Для определения первичного тока срабатывания можно воспользоваться следующим приближенным выражением

$$I_{СЗ} = \frac{2I_{СГ} + 1,5I_{НБ}}{k_В} \qquad (9)$$

где $I_{СГ}$ - собственный емкостный ток генератора, Табл.2;

$k_В$ - коэффициент возврата, равный ***0.93*** для реле типа ***РТЗ-51***;

$I_{НБ}$ - ток небаланса, приведенный к первичной стороне ***ТНП***; упрощенно можно принять ***(1 - 1,5)*** *А*.

Таблица 2

Тип турбогенератора	Номинальное напряжение, кВ	Емкостный ток генератора, А
Т-2-12-2	*10.5*	*0.46*
Т-2-12-2	*6.3*	*0.34*
Т-2-25-2	*10.5*	*0.92*
Т-2-25-2	*6.3*	*0.69*
Т-2-50-2	*10.5*	*1.43*
ТВФ-60-2	*10.5*	*0.99*
ТВФ-60-2	*6.3*	*0.70*
ТВФ-100-2	*15.75*	*3.34*
ТВФ-100-2	*13.8*	*2.15*
ТВФ-100-2	*10.5*	*1.48*
ТВ2-150-2	*18.0*	*3.14*
ТВВ-150-2	*18.0*	*1.64*
ТВФ-200-2	*11.0*	*2.88*
ТВВ-200-2	*15.75*	*0.90*
ТГВ-200	*15.75*	*3.43*

Реле РТЗ-51 имеет пределы регулирования тока срабатывания - (0.02 - 0,12) А. Ток срабатывания защиты от двойных замыканий принимается (200-300) А, что соответствует минимальной уставке РНТ-565.

Выдержка реле времени КТ выбирается из условий отстройки от переходных процессов при внешних замыканиях на землю и принимается равной *(1.5 - 2.0) сек.*

Примечание. Защита на ТНПШ в настоящее время серийно не выпускается.

2.3.2 Защита от замыканий на землю в обмотке статора турбогенератора, реагирующая на напряжение третьей гармоники

На генераторах энергоблоков в качестве защиты от замыканий на землю, как правило, устанавливается блок реле БРЭ1301, состоящий из органов напряжения первой и третьей гармоник и охватывающее всю обмотку статора без зоны нечувствительности. БРЭ1301 выпускается в двух исполнениях, ЗЗГ 11 и ЗЗГ 12.

Защита исполнения ЗЗГ 12 устанавливается на турбогенераторах типа ТВФ-63 и ТВФ-120 и включается на напряжение цепи $3U_0$ трансформатора напряжения на выводах генератора. В состав защиты входят орган первой гармоники с уставками срабатывания (5 - 20) В и орган третьей гармоники, реагирующий на производную напряжения по времени, уставка которого не регулируется. Основным недостатком защиты является возможность несрабатывания при отсутствии переходного процесса, например, при постепенном снижении уровня изоляции обмотки статора.

Защита типа ЗЗГ-11 применяется на генераторах мощностью 160 мВт и более. Она состоит из органа напряжения нулевой последовательности первой гармоники и органа третьей гармоники. Орган первой гармоники представляет максимальное реле напряжения с фильтром высших гармоник, органом третьей гармоники является реле напряжения с торможением. Орган первой гармоники включается на трансформатор напряжения со стороны нейтрали, а к реле с торможением подаются напряжения третьей гармоники от трансформаторов напряжения в нейтрали и на выводах генератора. Схема включения защиты приведена на *Рис.6.*

Трансформаторы напряжения *TV0* и *TV1* имеют номинальное напряжение, соответствующее номинальному напряжению генератора. Со стороны нейтрали, как правило, предусматривается установка сухого трансформатора типа ЗНОЛ. Допускается также использование масляного трансформатора типа ЗОМ, не имеющего класса точности. Уставку органа 1-ой гармоники в обоих исполнениях защиты рекомендуется принимать в пределах (10 -15) В. Для органа 3-ей гармоники защиты ЗЗГ-11 уставку коэффициента торможения можно принимать для всех турбогенераторов

равной $\boldsymbol{K_T} = 0.67$. Для отстройки защиты от переходных режимов ее время срабатывания должно быть больше *0.5 сек*.

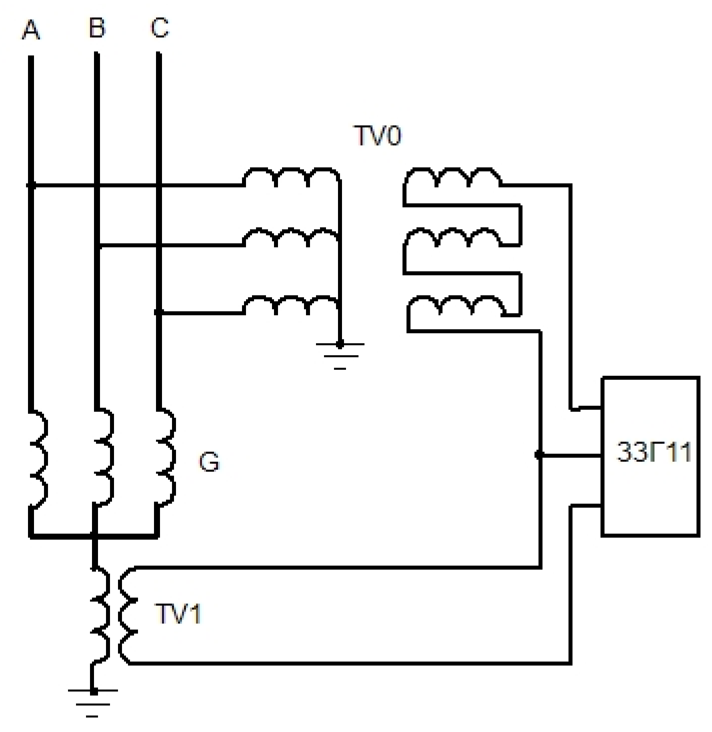


Рис.2 *Схема включения защиты ЗЗГ- 11*

2.3.3 Защита от замыканий на землю в обмотке статора турбогенератора, реагирующая на наложенный переменный ток

На ряде электростанций для генераторов, работающих на сборные шины компенсированной сети, применяется защита от замыканий на землю с наложением на цепь статора генератора переменного тока частоты 25 Гц [3]. Наложенное напряжение подается от источника контрольного тока *ИКТ*, выполненного на основе параметрического делителя частоты и включенного в цепь дугогасящего ректора ДГР *(Рис.3)*. Реагирующий орган РО содержит токовый элемент, фиксирующий увеличение контрольного тока, и реле блокировки, запрещающее работу защиты при внешних двухфазных коротких замыканиях.

Настройка защиты заключается в установке тока срабатывания и тока, при котором действие защиты блокируется. На основании рекомендаций разработчика ток срабатывания $\boldsymbol{I_{C3}}$ на частоте 25 Гц принимается равным $0,3A$, ток срабатывания блокировки при номинальной частоте, отнесенный к вторичным цепям, берется равным (60-70) mA.

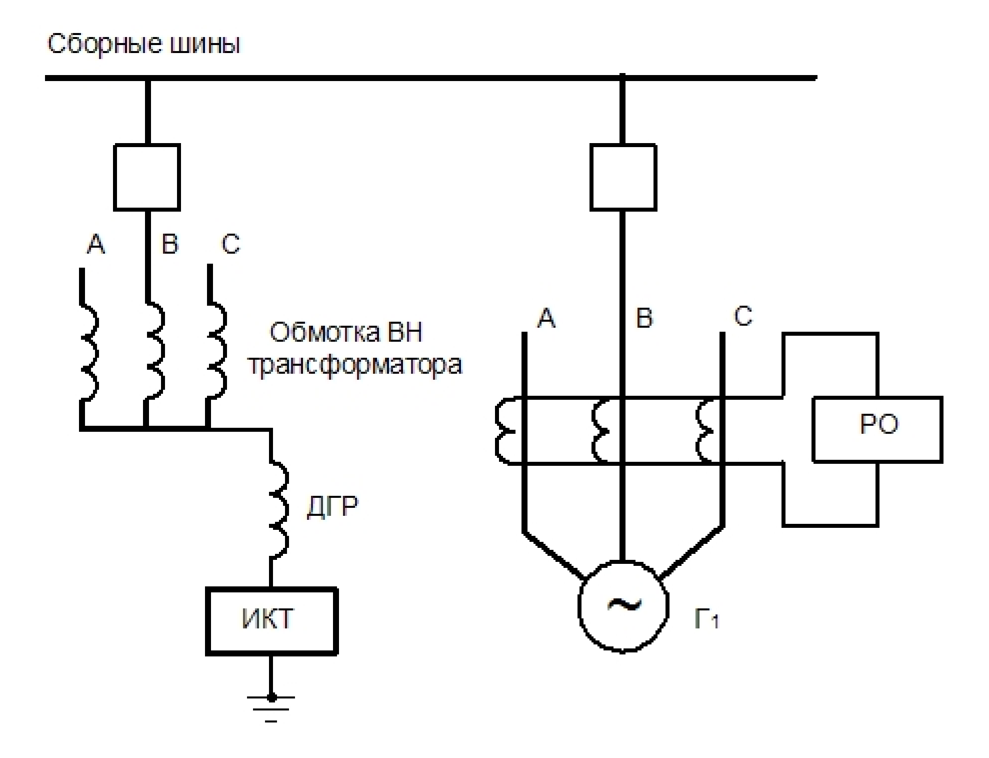


Рис.3 *Схема включения защиты на наложенном переменном токе*

2.3.4 Защита от замыканий на землю в обмотке статора, выполняемая с наложением на цепь статора постоянного тока

Защита с наложением постоянного тока на цепь статора генератора РЗГ-100 разработана в Томском политехническом университете [4] и успешно применяется на ряде электростанций России для блочных генераторов. Упрощенная схема защиты и ее включение показано на *Рис.4.* Основным недостатком защиты является наличие гальванической связи цепей защиты с первичными цепями генератора, однако, при ее и эксплуатации негативных последствий не выявлено.

Наложенный постоянный ток от источника через объединенные нейтрали обмоток высшего напряжения обмоток трансформаторов напряжения подается на обмотки статора. Величина тока в реагирующем органе РО определяется сопротивлением изоляции обмотки статора. В нормальном режиме работы наложенный ток незначителен, и защита не работает. При замыкании на землю или снижении уровня изоляции наложенный ток увеличивается, что приводит к срабатыванию сигнального элемента или сигнального и отключающих элементов одновременно.

Сигнальный элемент реагирует на сопротивление $R = 100 - 200$ кОм. Отключающий элемент срабатывает при $R \leq 10$ кОм.

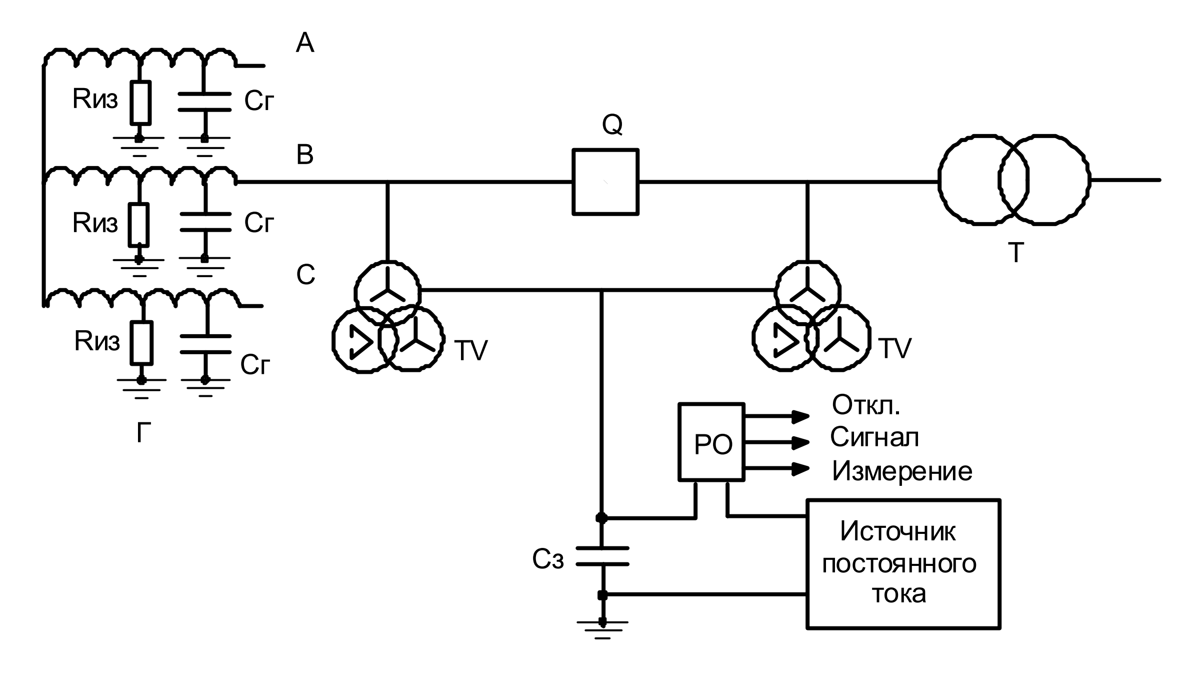


Рис.4 *Схема защиты на наложенном постоянном токе*

В защите предусмотрена цепь подключения измерительного прибора для контроля изоляции обмотки статора в процессе эксплуатации.

2.4 ВЫБОР И РАСЧЕТ ЗАЩИТ ОТ ВНЕШНИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Выбор типа защиты генераторов от внешних к.з. зависит от их мощности.

2.4.1 Защита генераторов мощностью до 30 МВт

Для генераторов малой мощности, до 30 мВт, используется максимальная токовая защита с блокировкой по напряжению.

Защита выполняется на трех токовых реле ***KA1***, подключенным к выводам статорной обмотки. Для отстройки защиты от перегрузок используется блокировка по напряжению на двух реле напряжения: реле напряжения обратной последовательности ***KV2*** и реле напряжения ***KV1***, включенного на междуфазное напряжение, *Рис.*5.

Ток срабатывания защиты отстраивается от номинального тока генератора

$$I_{СЗ} = \frac{k_Н}{k_В} I_{НОМ} \qquad (10)$$

где $k_Н = 1,1 - 1,2$ - коэффициент надежности;

$k_В = 0,8$ - коэффициент возврата;

$I_{НОМ}$ - номинальный ток генератора.

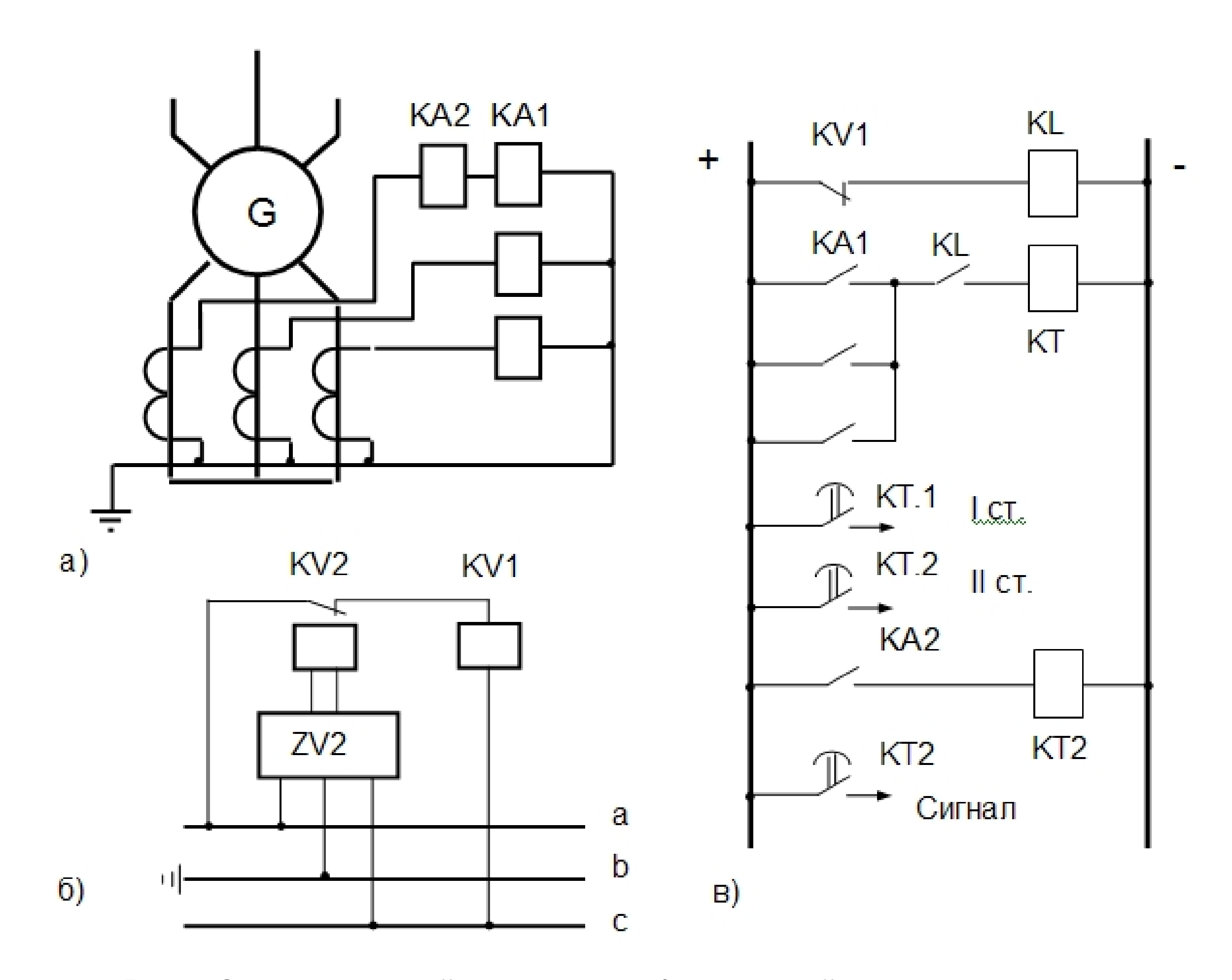


Рис.5 *Схема токовой защиты с блокировкой по напряжению: а) токовые цепи; б) цепи напряжения; в) цепи постоянного тока.*

Реле ***KA2*** выполняет функции защиты от перегрузки.

Напряжение срабатывания минимального реле напряжения ***KV1*** отстраивается от минимального рабочего напряжения

$$U_{CP\,KV1} = \frac{0{,}8U_{HOM}}{k_H k_B}, \qquad (11)$$

где $k_H = 1{,}1 - 1{,}2$ - коэффициент надежности;

$k_B = 1{,}25$ - коэффициент возврата реле минимального напряжения;

U_{HOM} - номинальное напряжение генератора.

Для предотвращения неправильного действия защиты при самозапуске электродвигателей собственных нужд допускается снижение напряжения срабатывания до величины $0{,}5U_{HOM}$.

Напряжение срабатывания реле напряжения обратной последовательности выбирается из условия отстройки от напряжения небаланса на выходе фильтра

$$U_{CP\,KV2} = 0{,}06U_{HOM} \qquad (12)$$

Выдержка времени защиты в ряде случаев имеет две уставки, первая отстраивается от времени действия защит отходящих присоединений и подает команду на отключение секционных и шиносоединительных выключателей, вторая, имеющая выдержку времени на ступень селективности больше чем первая, действует на отключение генераторного выключателя.

2.4.2 Защита генераторов мощностью (30 – 60) МВт

Для защиты генераторов мощностью (30 - 60) мВт от внешних несимметричных к.з. применяется двухступенчатая токовая защита обратной последовательности, *Рис.*6 .

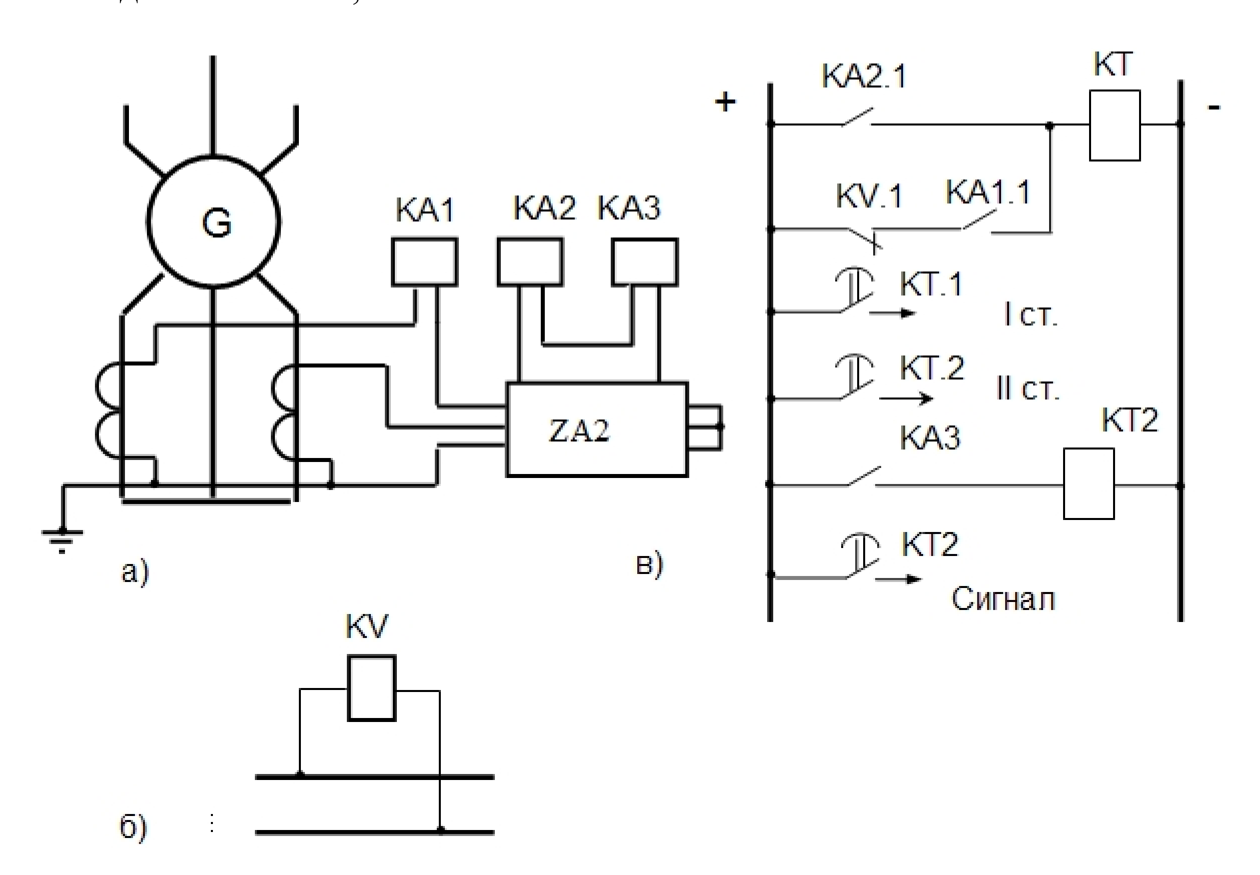


Рис.6 *Токовая защита обратной последовательности на реле типа РТФ-9 и приставкой для действия при симметричных к.з.: а) токовые цепи; б) цепи напряжения; в) цепи постоянного оперативного тока.*

Ток срабатывания первой ступени защиты, реле ***KA2,*** имеет диапазон уставок $(0{,}4 - 1{,}5)I_{ном}$. Выбранное значение тока должно обеспечивать требуемую чувствительность к несимметричному к.з. на выводах генератора и быть согласованным по чувствительности с защитами соседних элементов, трансформаторов и линий.

Реле второй ступени ***KA3*** предназначено для сигнализации возникновения несимметрии в первичной сети, диапазон уставок $(0,04 - 0,16)I_{НОМ}$.

Ступень изменения уставок – 10% от минимальной уставки.

Уставки срабатывания реле ***KA1*** и реле ***KV*,** обеспечивающих действие защиты при симметричных к.з., выбираются по выражениям (10) и (11).

2.4.3 Защита генераторов мощностью более 60 МВт

На турбогенераторах мощностью 60 мВт и более для защиты от внешних симметричных к.з. применяется дистанционная защита, а от несимметричных - четырехступенчатая токовая защита обратной последовательности на блок-реле типа – БЭ 1101.

Дистанционная защита

Дистанционная защита выполняется на блок-реле типа БРЭ 2801 с круговой или эллиптической характеристикой, смещенной в III квадрант. Защита включается на разность токов ($I_A - I_B$) трансформаторов тока, установленных в нейтрали генератора, и на междуфазное напряжение U_{AB} трансформатора напряжения, установленного на выводах генератора, *Рис.7*.

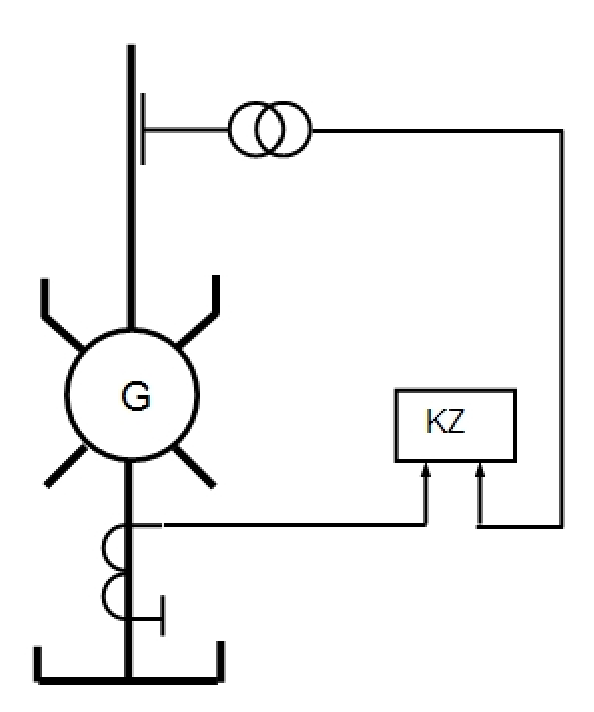


Рис.7 *Схема включения дистанционной защиты от внешних к.з.*

Сопротивление срабатывания защиты выбирается из условия отстройки от максимального нагрузочного режима

$$Z_{СЗ} = \frac{Z_{НАГР}}{k_Н k_В cos(\varphi_{МЧ} - \varphi_{НАГР})} \tag{13}$$

где $k_Н = 1,2$ - коэффициент надежности;

$k_В = 1,05$ - коэффициент возврата;

$\varphi_{МЧ} = 65^0 - 80^0$ - угол максимальной чувствительности;

$\varphi_{НАГР}$ - угол нагрузки;

$Z_{НАГР} = \frac{U_{МИН}}{\sqrt{3}\, 1,5\, I_{НОМ}}$;

$U_{МИН} = 0,95 U_{НОМ}$ - номинальное напряжение на выводах генератора.

Для улучшения условий дальнего резервирования в ряде случаев целесообразно использовать эллиптическую характеристику. Тогда сопротивление срабатывания (большая ось эллипса) может быть увеличено до значения $Z_{СЗ\,МАКС} \le 1,85 Z_{СЗ}$, а малая ось эллипса должна быть не более $Z_{СЗ}$ при круговой характеристике, что достигается соответствующим выбором коэффициента эллиптичности (из значений $k_Э = 0,5; 0,65; 0,8$)

$$k_Э \le \frac{Z_{СЗ}}{Z_{СЗ\,МАКС}} \tag{14}$$

Уставка на реле подсчитывается по формуле

$$Z_{СР} \le Z_{СЗ} \frac{n_{ТН}}{n_{ТТ}} \tag{15}$$

где $n_{ТН}$ - коэффициент трансформации трансформаторов напряжения;

$n_{ТТ}$ - коэффициент трансформации трансформаторов тока.

Смещение характеристики срабатывания в III квадрант по линии максимальной чувствительности целесообразно принимать для круговой характеристики срабатывания 12 % , для эллиптической - 11 %.

Защита выполняется с двумя выдержками времени, обеспечивающими дальнее и ближнее резервирование. Требуемое значение коэффициента чувствительности соответственно должно быть не менее 1.2 и 1.5.

Токовая защита обратной последовательности

Защита генераторов такой мощности выполняется на блок-реле БЭ 1101 и содержит две отсечки, сигнальный, пусковой и интегральные органы. Чувствительная отсечка ***I*** предназначена для дальнего резервирования, грубая отсечка ***II*** - для ближнего резервирования, интегральный орган -

для защиты генератора от перегрузки токами обратной последовательности.

Ток срабатывания отсечки ***II*** выбирается по выражению

$$I_{2\,СР\,ОТС\,II*} = \frac{I^{(2)}_{2\,*}}{k_ч}, \qquad (16)$$

где $k_ч = 1,5$ - требуемый коэффициент чувствительности

$I^{(2)}_{2\,*} = \dfrac{1}{x''_d + x_2}$ - сверхпереходный ток обратной последовательности при коротком замыкании на выводах генератора;

x''_d - сверхпереходное сопротивление генератора, о.е.;

x_2 - сопротивление обратной последовательности генератора, о.е.

Принимать более высокий коэффициент чувствительности не рекомендуется во избежание излишних срабатываний при к.з. за трансформатором. Диапазон уставок отсечки ***II*** - $(0,7 - 1,9)I_{НОМ}$. Выдержка времени отсечки ***II*** принимается равной 0.3 сек.

Применение отсечки ***II*** необходимо на энергоблоках с выключателем в цепи генератора, где она обеспечивает сохранение в работе трансформатора блока и питание собственных нужд при повреждении генератора. и отказе основной защиты. На энергоблоках без выключателей в цепи генератора установка отсечки ***II*** не обязательна.

Ток срабатывания отсечки ***I*** выбирается из условий обеспечения необходимой чувствительности при двухфазном к.з. в конце зоны резервирования и согласования с резервными защитами от междуфазных к.з., диапазон уставок по току - $(0,4 - 1,2)I_{НОМ}$.

Отсечка ***I*** с первой выдержкой времени, отстроенной от выдержки времени резервных защит присоединений, действует на деление шин, а со второй, принимаемой на ступень селективности больше первой - на отключение генераторного выключателя или выключателя блока.

Интегральный орган защиты имеет характеристику срабатывания, соответствующую перегрузочной способности генератора к токам обратной последовательности, и запускается пусковым органом, $I_{2\,СР\,ПО} = (0,08 - 0,24)I_{НОМ}$.

Ток срабатывания сигнального органа принимается равным $I_{2\,СР\,СО} = 0,09I_{НОМ}$, выдержка времени должна быть больше времени действия резервных защит блока.

2.5 ЗАЩИТА ОТ СИММЕТРИЧНОЙ ПЕРЕГРУЗКИ ОБМОТКИ СТАТОРА

Защита выполняется на блок-реле типа БЭ 1103 и включается на ток одной фазы статора. Блок защиты включает следующие органы:

сигнальный орган с током срабатывания $I_{СР\,СО} = 1{,}05 I_{НОМ}$ и независимой выдержкой времени;

пусковой орган с током с током срабатывания $I_{СР\,СО} = 1{,}1 I_{НОМ}$. Предназначен для пуска интегрального органа;

интегральный орган, реализующий нагрузочную характеристику генератора. Может действовать с тремя выдержками времени по аналогии с остальными резервными защитами блочного генератора.

Состав защиты, выполненной на микропроцессорной основе и входящей в состав шкафа типа ШЭ 1111, дополнен органом токовой отсечки. Для сигнального, пускового и органа токовой отсечки регулируемый диапазон уставок $(1{,}0 - 2{,}0) I_{НОМ}$ с шагом $0{,}01\, I_{НОМ}$, коэффициент возврата не ниже 0,98.

2.6 ЗАЩИТА ОТ ПОТЕРИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Защита выполняется на реле сопротивления блок-реле БРЭ 2801. На токовый вход реле сопротивления подается разность токов двух фаз от трансформаторов тока, установленных в нейтрали или на выводах генератора, на напряженческий - междуфазное напряжение от трансформаторов напряжения на выводах генератора.

Для предотвращения срабатывания реле при нарушениях синхронизма в системе его круговая характеристика смещается по оси $j\,X$ в III и IV квадранты, $Z_{СМ} = 0{,}4 x'_d$, выдержка времени берется равной (1 - 2) сек. Диаметр окружности характеристики принимается равным $Z_{УСТ} = 1{,}1 x_d$.

2.7 ЗАЩИТА ЦЕПЕЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Защита ротора от перегрузки током возбуждения выполняется с помощью блок-реле БЭ 1102. Защита подключается к трансформаторам тока, соединенным в треугольник и установленным на фазах обмоток высшего напряжения выпрямительного трансформатора. Блок-реле защиты состоит из следующих органов:

сигнального, с током срабатывания $I_{СР\,СО} = 1{,}07 I_{НОМ}$ и независимой выдержкой времени;

пускового, с током с током срабатывания $I_{СР\,СО} = (1{,}05 - 1{,}2) I_{НОМ}$.

интегрального, реализующего нагрузочную характеристику генератора и имеющего двухступенчатый выход. Первая ступень действует на разгрузку, вторая – на останов блока.

Защита от замыканий на землю в цепи возбуждения выполняется с помощью следующих блоков:

БЭ 1104 - контроль сопротивления изоляции;

БЭ 1105 – блок частотного фильтра.

Защита имеет две ступени срабатывания: чувствительную и грубую. Порог чувствительности – 80 кОм. Первая ступень при снижении изоляции до величины 10 кОм действует на сигнал, вторая ступень формирует команду на отключение генератора при значении $R_{ИЗ} \leq 2{,}5$ кОм.

2.8 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

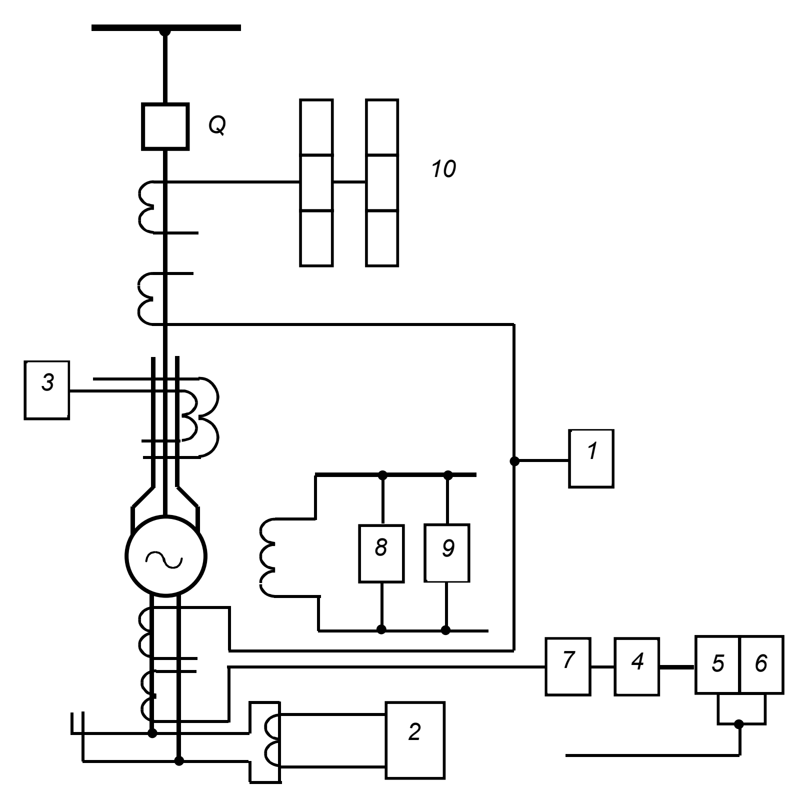


Рис.8 *Принципиальная схема релейной защиты турбогенератора ТВФ-100-2. Цепи переменного тока и напряжения. 1.Продольная дифференциальная защита. 2.Поперечная дифференциальная защита. 3.Защита от замыканий на землю в обмотке статора. 4.Токовая защита обратной последовательности. 5. Резервная дистанционная защита. 6.Защита от потери возбуждения. 7. Сигнализация симметричной перегрузки генератора. 8.Защита от перегрузки обмотки ротора. 9.Защита от замыканий на землю в цепи возбуждения. 10.Реле тока УРОВ*

3

Защита трансформаторов и автотрансформаторов

При выполнении защит трансформаторов и автотрансформаторов должны быть учтены следующие режимы:

- многофазные замыкания в обмотках и на выводах;
- однофазные замыкания в обмотках и на выводах;
- витковые замыкания в обмотках;
- внешние короткие замыкания;
- повышение напряжения на неповрежденных фазах (для трансформаторов 110 кВ, работающих в режиме изолированной нейтрали);
- частичный пробой изоляции вводов напряжением 500 кВ и более;
- перегрузка трансформатора;
- понижение уровня масла;
- "пожар" стали магнитопровода.

3.1 ВЫБОР ТИПА ЗАЩИТ

Для защиты трансформаторов от повреждений и ненормальных режимов в соответствии с ПУЭ [5] должны быть предусмотрены следующие типы релейной защиты.

1. От повреждений внутри кожуха, сопровождающихся выделением газа и (или) понижением уровня масла - газовая защита с действием на сигнал и отключение:

для трансформаторов мощностью 6300 кВА и более;

для внутрицеховых понижающих трансформаторов мощностью 630 кВА и более;

для трансформаторов мощностью (1000-4000) кВА, если отсутствует быстродействующая защита.

2. От повреждений на выводах и внутренних повреждений - токовая отсечка или продольная дифференциальная защита.

Продольная дифференциальная защита ставится на трансформаторах мощностью 6300 кВА и более, на трансформаторах меньшей мощности - токовая отсечка. Если токовая отсечка не проходит по условиям чувствительности, то дифференциальная защита может быть установлена на трансформаторах меньшей мощности, но не менее 1000 кВА.

3. От токов внешних коротких замыканий должны быть установлены следующие защиты с действием на отключение:

максимальная токовая защита для трансформаторов мощностью до 1000 кВА ;

максимальная токовая защита или максимальная токовая защита с комбинированным пуском напряжения или токовая защита обратной последовательности для трансформаторов мощностью 1000 кВА и более;

дистанционная защита на понижающих автотрансформаторах напряжением 220 кВ и более, если это необходимо по условиям дальнего резервирования.

4. От возможной перегрузки на трансформаторах мощностью 400 кВА и более следует предусматривать максимальную токовую защиту с действием на сигнал или на разгрузку и на отключение.

5. От токов внешних замыканий на землю при наличии заземленной нейтрали для трансформаторов мощностью 1000 кВА и более устанавливается максимальная токовая защита нулевой последовательности, если это необходимо по условиям дальнего резервирования.

3.2 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

3.2.1 Общие положения

Дифференциальная защита трансформаторов может быть выполнена на продолжительное время выпускаемых реле типа РНТ-565, ДЗТ-11, ДЗТ-21(23); на сравнительно новых реле, основанных на интегральной электронике, типа РСТ 15, РСТ 23; на микропроцессорной технике.

В типовых решениях принято:

1. На понижающих двухобмоточных трансформаторах с группой соединения обмоток «звезда с нулем/треугольник» дифференциальную защиту выполняют в двухрелейном исполнении.

2. На понижающих трехобмоточных трансформаторах и автотрансформаторах с группой соединения обмоток «звезда с нулем/звезда с нулем/ треугольник» дифференциальную защиту выполняют в трехрелейном исполнении.

3. На повышающих трехобмоточных трансформаторах и автотрансформаторах с группой соединения обмоток «звезда с нулем/звезда с нулем/ треугольник» дифференциальную защиту выполняют в трехрелейном исполнении.

3.2.2 Дифференциальная токовая защита с реле типа РНТ 560

Для выполнения защиты применяют реле типа РНТ-565. Реле РНТ-566 и РНТ-566/2 предназначены при использовании в плечах дифференциальной защиты трансформаторов тока с разными номинальными значениями вторичных токов.

В соответствии с " Руководящими указаниями по релейной защите. Выпуск 13А " использование реле РНТ-565 на вновь проектируемых подстанциях не рекомендуется, поскольку достаточно часто на трансформаторах с РПН такие защиты не удовлетворяют требованиям чувствительности. Однако в эксплуатации до настоящего времени находится большое количество таких защит и в отдельных случаях их можно применять на двухобмоточных трансформаторах мощностью до 16 МВА.

Возможная схема включения (для одной фазы) и упрощенная схема внутренних соединений реле РНТ-565 приведены на *Рис.9.*

Схема реле при применении его для защиты трехобмоточных трансформаторов позволяет менять токи срабатывания в пределах *(2.87 - 12.5) А* При применении реле для защиты двухобмоточных трансформаторов ток срабатывания может регулироваться в пределах *(1.45 - 12.5) А.*

Для расчета дифференциальной защиты с реле РНТ-565 рекомендуется следующий порядок:

1. Определяются первичные токи на сторонах защищаемого трансформатора в номинальном режиме работы, выбираются трансформаторы тока и определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты.

Для компенсации углового сдвига токов силовых трансформаторов, соединенных по схеме " звезда - треугольник " или " треугольник - звезда", трансформаторы тока на стороне звезды силового трансформатора необходимо соединять по схеме треугольника, а на стороне звезды - по схеме треугольника.

Для уменьшения погрешностей коэффициенты трансформации трансформаторов тока рекомендуется принимать несколько завышенными по сравнению с расчетными, и по возможности такими, чтобы вторичный ток не превышал величины 5 А.

2. Предварительно определятся первичный ток срабатывания защиты, выбираемый по следующим условиям:

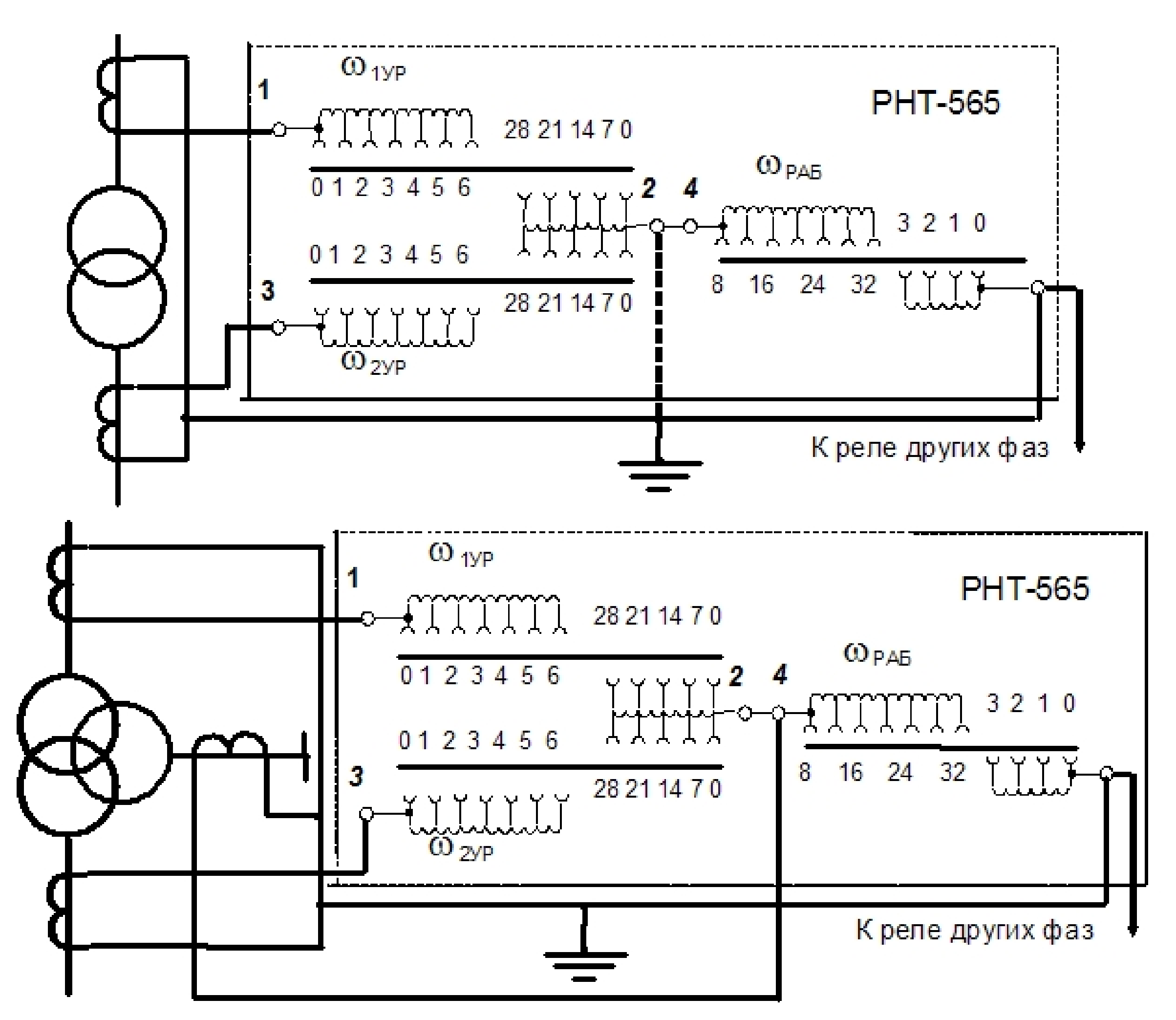


***Рис.9** Примеры схем включения реле типа РНТ 565*

2.1 По условию отстройки защиты от тока небаланса при внешнем коротком замыкании:

$$I_{СЗ} \geq k_Н I_{НБ} \tag{17}$$

где $k_Н = 1,3$ - коэффициент надежности, учитывающий погрешности реле, ошибки расчета и требуемый запас;

$I_{НБ}$ - ток небаланса, протекающий через защиту, при внешнем коротком замыкании; может быть определен по выражению:

$$I_{НБ} = I'_{НБ} + I''_{НБ}; \tag{18}$$

$I'_{НБ}$ - составляющая, обусловленная погрешностью трансформаторов тока;

$$I'_{НБ} = k_A k_{ОДН} f_i I_{КЗ\ ВН\ МАКС} \tag{19}$$

$k_A = 1$ - коэффициент, учитывающий наличие апериодической составляющей в токе к.з.;

$k_{ОДН} = 0,5 - 1$ - коэффициент однотипности трансформаторов тока;

$f_i = 0,1$ - относительное значение полной погрешности трансформа торов тока;

$I_{КЗ\ ВН\ МАКС}$ - периодическая составляющая тока внешнего трехфазного к.з. (для $t = 0$) или ток качаний, проходящие через защищаемый трансформатор ;

$I''_{НБ}$ - составляющая, обусловленная наличием РПН у силового трансформатора;

$$I''_{НБ} = (\Delta U_1 k_{ТОК1} + \Delta U_2 k_{ТОК2})I_{КЗ\ ВН\ МАКС} \quad (20)$$

ΔU_1, ΔU_2 - относительные погрешности, обусловленные регулированием напряжения на сторонах защищаемого трансформатора, принимаются равными половине диапазона регулирования;

$k_{ТОК1}$, $k_{ТОК2}$ - коэффициенты токораспределения, принимаются равными отношению тока короткого замыкания на стороне, где производится регулирования, к полному току внешнего короткого замыкания.

2.2 По условию отстройки от режима включения ненагруженного трансформатора под напряжение

$$I_{СЗ} \geq k_H I_{НОМ}, \quad (21)$$

где $k_H = 1 - 1,3$ - коэффициент надежности

$I_{НОМ}$ - номинальный ток трансформатора;

Из двух полученных значений по пунктам 2.1 и 2.2 выбирается большее и принимается в качестве расчетного.

3. Производится предварительная проверка чувствительности защиты с целью выяснения в первом приближении возможности использования реле РНТ-560 или необходимости использования реле ДЗТ-11.

Чувствительность защиты определяется при металлическом повреждении на выводах защищаемого трансформатора. Расчетные режимы подстанций и питающих систем являются реально возможными режимами, обуславливающие минимальный ток повреждения. При этом на сторонах трансформатора, примыкающих к сети с большим током замыкания на землю, следует рассматривать как междуфазные, так и однофазные на землю.

Для двухобмоточных трансформаторов и для ориентировочных расчетов защиты трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов коэффициент чувствительности может быть определен по выражению:

$$k_ч = \frac{I^{(m)}_{K\ MIN} k^{(m)}_{CX\ N}}{I_{C3} k^{(3)}_{CX\ N}}, \qquad (22)$$

где $I^{(m)}_{K\ MIN}$ - минимальное значение тока короткого замыкания вида m ($m = 3$ - трехфазное к.з.; $m = 2$ -двухфазное к.з.; $m = 1$ - однофазное замыкание) в защищаемой зоне;

I_{C3} - ток срабатывания защиты;

$k^{(3)}_{CX\ N}$ - коэффициент схемы, определяется видом повреждения m, схемой соединения трансформаторов тока защиты на рассматриваемой стороне N и схемой обмоток защищаемого трансформатора,

Таблица 3

N пп	Вид короткого замыкания	Место короткого замыкания	$\frac{k^{(m)}_{CX\ N}}{k^{(3)}_{CX\ N}}$
1	*Трехфазное*	*На стороне треугольника или звезды*	1
2	*Двухфазное*	*На стороне звезды*	$\frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$
		На стороне треугольника	1
3	*Однофазное*	*На стороне звезды*	$\frac{1}{\sqrt{3}}$

Таблица составлена исходя из следующего:

- на стороне звезды силового трансформатора трансформаторы тока соединены в треугольник, а на стороне треугольника - в звезду;

- значения даны для трехрелейной схемы защиты, для двухрелейной - значения приведены в скобках.

В соответствии с ПУЭ [5] значение коэффициента чувствительности должно быть не менее двух. Если требуемое значение коэффициента чувствительности не выполняется, то следует перейти к расчету защиты с торможением.

4. По выражению (23) определяется число витков насыщающегося трансформатора реле для основной стороны $\omega_{OCH\ PACЧ}$

$$\omega_{ОСН\ РАСЧ} = \frac{F_{СР}}{I_{СР\ ОСН}}, \qquad (23)$$

где $F_{СР} = 100A$ - магнитодвижущая сила срабатывания реле типа ***РНТ-565*** или ***РНТ-566***;

$I_{СР\ ОСН}$ - ток срабатывания реле, отнесенный к основной стороне. За основную сторону принимается сторона с набольшим вторичным током в плечах защиты или сторона основного питания, когда вторичные токи близки по величине.

Полученное значение $\omega_{ОСН\ РАСЧ}$ округляется до ближайшего меньшего значения, которое можно установить на насыщающемся трансформаторе реле.

5. По выражениям (24) и (25) определяются числа витков для других сторон защищаемого трансформатора:

$$\omega_{1РАСЧ} = \omega_{ОСН} \frac{I_{ОСН\ ВТ}}{I_{1ВТ}}; \qquad (24)$$

$$\omega_{2РАСЧ} = \omega_{ОСН} \frac{I_{ОСН\ ВТ}}{I_{2ВТ}}, \qquad (25)$$

где $\omega_{ОСН}$ - принятое число витков для основной стороны;

$I_{ОСН\ ВТ}$ - вторичный ток в плечах защиты для основной стороны;

$I_{1ВТ}$, $I_{2ВТ}$ - вторичные токи в плечах защиты для неосновных сторон;

$\omega_{1РАСЧ}$, $\omega_{2РАСЧ}$ - расчетные числа витков насыщающегося трансформатора реле для неосновных сторон.

Расчетные числа витков $\omega_{1РАСЧ}$, $\omega_{2РАСЧ}$ округляются до ближайших целых значений, а значение тока небаланса уточняется за счет учета составляющей $I'''_{НБ}$, вызванной округлением расчетного числа витков для неосновных сторон.

$$I'''_{НБ} = \left(\frac{\omega_{1РАСЧ} - \omega_1}{\omega_{1РАСЧ}} k_{ТОК1} \pm \frac{\omega_{2РАСЧ} - \omega_2}{\omega_{2РАСЧ}} k_{ТОК2} \right) I_{КЗ\ ВН\ МАКС} \qquad (26)$$

где ω_1, ω_2 - принятые числа витков для неосновных сторон.

Использование знака " + " или знака " - " определяется направлением составляющих тока короткого замыкания: при одинаковом направлении используется знак " + ", при противоположном знак " - ".

Значение уточненного тока небаланса

$$I_{НБ} = I'_{НБ} + I''_{НБ} + I'''_{НБ} \qquad (27)$$

6. Определяется уточненное значение тока срабатывания защиты с учетом составляющей $I'''_{НБ}$ и ток срабатывания реле $I'_{СР}$, соответствующий этому значению.

7. Значение тока $I'_{СР}$ сравнивается со значением $I_{СР}$, соответствующему принятому числу витков обмотки насыщающегося трансформатора реле для основной стороны. Если ток срабатывания реле $I'_{СР}$ увеличился более чем на 5% , то число витков для основной стороны должно быть изменено на меньшее ближайшее значение. При этом расчет по пунктам *5 - 7* повторяется до тех пор, пока ток срабатывания защиты окажется отстроенным от $I'''_{НБ}$

8. Оценивается чувствительность защиты при расчетных видах повреждений. Если полученное значение коэффициента чувствительности окажется меньше двух, а расчетным условием для выбора тока срабатывания является условие (23) , то для защиты следует использовать реле с торможением.

Пример расчета дифференциальной защиты трансформатора на реле типа РНТ-565

В примере дан расчет дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора 110/11 кВ мощностью 16 МВА, имеющего РПН на стороне ВН в пределах ± 10 %.

Исходная схема для примера расчета, а также схема замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей приведена на *Рис.10.*

Расчет производится в следующем порядке.

1. Определяются первичные токи силового трансформатора, выбираются трансформаторы тока и находятся соответствующие вторичные токи в плечах защиты. Трансформаторы тока, соединенные в треугольник (сторона 110 кВ) выбираются по первичному току $\sqrt{3}I_{НОМ}$, для того чтобы вторичные токи не превышали величину 5 А.

Расчеты приведены в *Табл.4.*

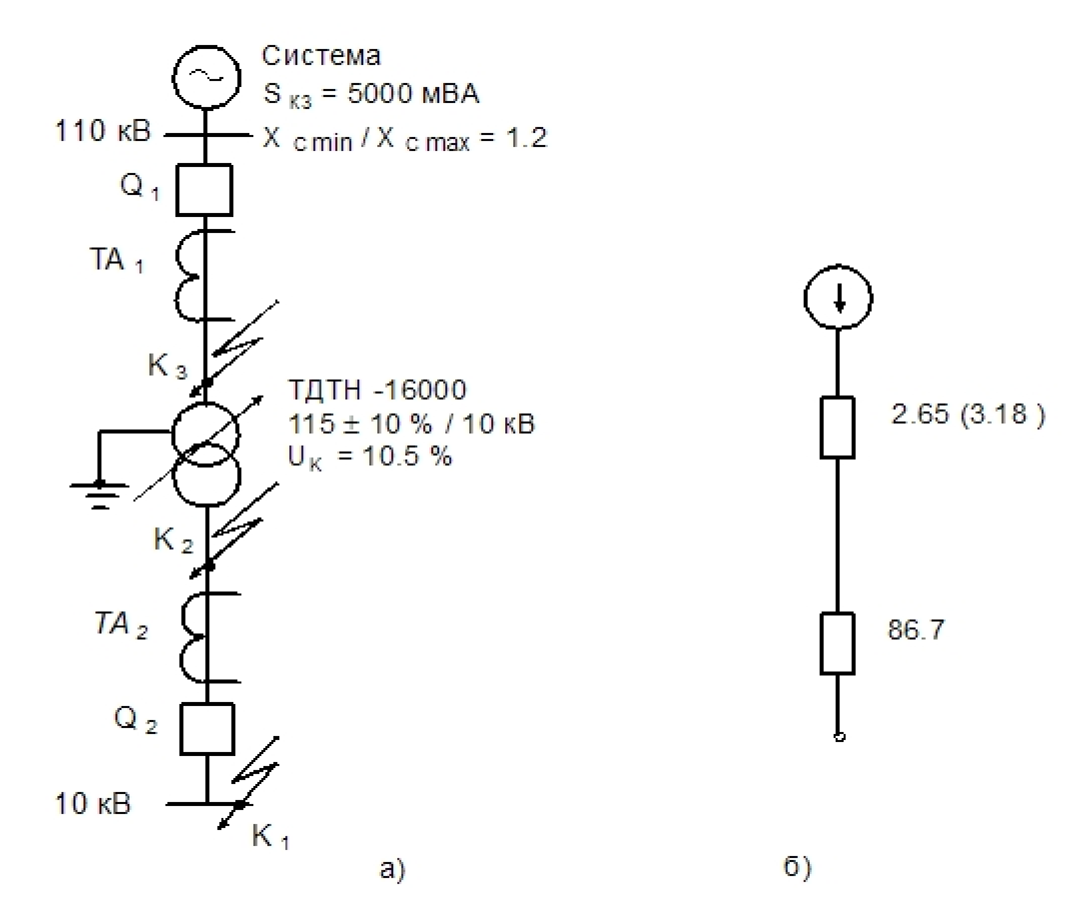


Рис.10 *Исходная схема и схема замещения двухобмоточного трансформатора (сопротивления схемы замещения даны в Омах и приведены к напряжению 115 кВ; в скобках указаны сопротивления в минимальном режиме)*

Таблица 4

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовые значения для сторон	
		110 кВ	10 кВ
Первичные номинальные токи трансформатора, А	$I_{НОМ} = \dfrac{S_{НОМ}}{\sqrt{3}I_{НОМ}}$	$\dfrac{16000}{\sqrt{3}\cdot 110} = 84$	$\dfrac{16000}{\sqrt{3}11} = 840$
Схема соединения трансформаторов тока		*Треугольник*	*Звезда*
Коэффициенты трансформации трансформаторов тока	n_{TT}	200/5	1500/5
Вторичные токи в плечах защиты, А	$I_{НОМ\ ВТ} = \dfrac{I_{НОМ}k_{CX}}{n_{TT}}$	$\dfrac{84\sqrt{3}}{200/5} = 3,64$	$\dfrac{840}{1500/5} = 2,8$

2. Определяется первичный максимальный ток короткого замыкания, проходящий через защищаемый трансформатор при внешнем к.з. (т. K_1).

$$I_{kmax} = 743 \text{ А}.$$

3.Предварительно определяется первичный ток срабатывания защиты:

- по условию отстройки от тока небаланса (21) без учета составляющей $I'''_{НБ}$,

$$I_{СЗ} = 1{,}3(1 \cdot 1 \cdot 0{,}1 + 0{,}1)743 = 1{,}3 \cdot 148{,}6 = 193 А.$$

- по условию отстройки от броска тока намагничивания

$$I_{СЗ} = 1{,}3 \cdot 84 = 109{,}2 А.$$

Таким образом, расчетным условием для выбора тока срабатывания является отстройка от тока небаланса

$$I_{СЗ} = 193 А.$$

4.Производится предварительная проверка чувствительности защиты.

В рассматриваемом примере расчетным по чувствительности является двухфазное к.з. на стороне в минимальном режиме работы системы

$$I^{(2)}_{k\,min} = \frac{115000}{\sqrt{3}(3{,}18 + 86{,}7)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 639{,}7 А.$$

По выражению (22)

$$k_{Ч\,min} = \frac{640 \cdot 1}{193} = 3{,}3.$$

Расчет с реле типа РНТ - 565 следует продолжить.

5. Определятся число витков обмоток насыщающегося трансформатора, которое затем уточняются с учетом составляющей $I'''_{НБ}$.

Расчеты сведены в *Табл. 5.*

Таблица 5

№ пп	Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовые значения
1	*Расчетный ток срабатывания реле на основной стороне, А*	$I_{СР\,ОСН} = \frac{k_{СХ} I_{СЗ}}{n_{ТТ110}}$	$\frac{\sqrt{3} \cdot 193}{200/5} = 8{,}35$
2	*Расчетное число витков обмотки насыщающегося трансформатора тока (НТТ) реле для основной стороны, витки*	$\omega_{ОСН\,РАСЧ} = \frac{F_{РАСЧ}}{I_{СР\,ОСН}}$	$\frac{100}{8{,}35} = 11{,}97$

Таблица 5 (Продолжение)

№ пп	Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовые значения
3	*Принятое число витков обмотки НТТ реле для основной стороны, витки*	$\omega_{ОСН}$	11
4	*Ток срабатывания реле на основной стороне, А*	$I_{СР\,ОСН} = \dfrac{F_{РАСЧ}}{\omega_{ОСН}}$	$\dfrac{100}{11} = 9{,}1$
5	*Расчетное число витков обмотки насыщающегося трансформатора тока (НТТ) реле для неосновной стороны, витки*	$\omega_{1\,РАСЧ} = \omega_{ОСН} \dfrac{I_{ОСН\,ВТ}}{I_{1\,ВТ}}$	$11\dfrac{3{,}64}{2{,}8} = 14{,}3$
6	*Принятое число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны, витки*	ω_1	14
7	*Составляющая* $I'''_{НБ}$, *А*	$I'''_{НБ} = \left\lvert \dfrac{\omega_{1\,РАСЧ} - \omega_1}{\omega_{1\,РАСЧ}} \right\rvert \times$ $\times I_{КЗ\,ВН\,МАКС}$	$\dfrac{14{,}3-14}{14{,}3} 743 = 15$
8	*Уточненное значение тока срабатывания защиты* $I_{СЗ}$, *А*	$I_{СЗ} \geq k_Н (I'_{НБ} + I''_{НБ} +$ $+ I'''_{НБ})$	$193 + 1{,}3 \cdot 15 =$ $= 212$
9	*Уточненный ток срабатывания реле на основной стороне, А*	$I'_{СР\,ОСН} = \dfrac{k_{СХ} I_{СЗ}}{n_{ТТ110}}$	$\dfrac{\sqrt{3} \cdot 212}{200/5} = 9{,}2$
10	*Окончательно принятое число витков НТ реле для установки на основной стороне (110 кВ) и неосновной стороне (10 кВ), витки*	$\omega_{ОСН}$ ω_1	11 14

6. Оценивается чувствительность защиты при двухфазном к.з. в т. K_2 в минимальном режиме работы системы

$$k_{Ч\,min} = \frac{640 \cdot 1}{212} = 3$$

Рассчитанная защита имеет достаточную чувствительность и может быть рекомендована к установке.

3.2.3 Дифференциальная токовая защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов с реле типа ДЗТ 11

Реле серии ДЗТ-11 выполняется в следующих модификациях: ДЗТ-11, ДЗТ-11/2, ДЗТ-11/3, ДЗТ-11/4.

Реле типа ДЗТ-11 обеспечивает получение тормозных характеристик от одной группы измерительных трансформаторов тока. Они имеют по одному насыщающемуся трансформатору тока с одной тормозной обмоткой и отличаются числом витков и количеством рабочих и уравнительных обмоток.

Реле ДЗТ - 11 и ДЗТ - 11/2 имеют одну рабочую и две уравнительных обмотки, ДЗТ-11/3 и ДЗТ-11/4 имеют три рабочие обмотки.

Схема внутренних соединений и принципиальная схема включения реле ДЗТ-11 приведены на *Рис. 10* . Тормозные характеристики реле типа ДЗТ - 11 приведены на *Рис.11*.

Для расчета дифференциальной защиты с реле типа ДЗТ-11 рекомендуется следующий порядок расчета:

1. Определяются первичные токи на сторонах защищаемого трансформатора в номинальном режиме работы, выбираются трансформаторы тока и определяются соответствующие вторичные токи в плечах защиты.

2. Выбирается место установки тормозной обмотки из условия обеспечения максимальной чувствительности защиты. При этом можно руководствоваться следующими правилами:

- на понижающих двухобмоточных трансформаторах тормозная обмотка подключается к трансформаторам тока, установленным на стороне низшего напряжения;

- на трехобмоточных трансформаторах тормозная обмотка подключается к стороне, при внешнем к.з. на которой ток небаланса имеет максимальное значение, или на сумму токов сторон среднего и низшего напряжений;

- на автотрансформаторах - к трансформаторам тока, установленным на стороне среднего напряжения.

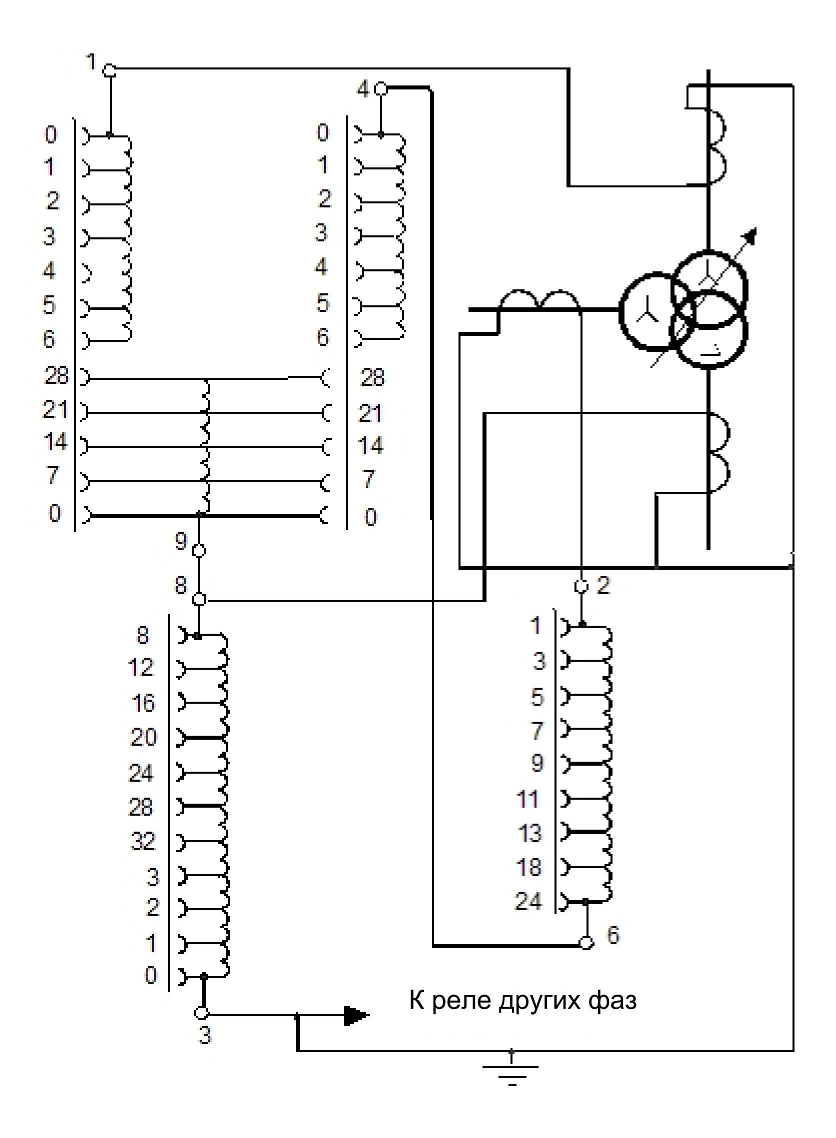


Рис.11 *Пример принципиальной схемы включения реле типа ДЗТ - 11*

3.Определяется ориентировочное значение первичного минимального тока срабатывания защиты без учета составляющей $I_{НБ}^{'''}$ исходя из принятого места установки тормозной обмотки.

4. Определяется число витков обмоток насыщающегося трансформатора тока реле для основной и неосновной сторон, исходя из выбранного тока срабатывания защиты. Эти числа витков уточняются после учета составляющей $I_{НБ}^{'''}$.

5. Определяется необходимое число витков тормозной обмотки. Для обеспечения несрабатывания реле при внешних к.з. на тормозной обмотке должно быть включено $\omega_{ТОРМ}$, определяемое по выражению

$$\omega_{ТОРМ} \geq k_{Н} \frac{I_{НБ\,РАСЧ}\,\omega_{РАБ}}{I_{ТОРМ}\,tg\alpha} \qquad (28)$$

где $I_{НБ\,РАСЧ}$ и $I_{ТОРМ}$ - соответственно первичный ток небаланса, определенный по выражению (17) и первичный расчетный ток при расчетном внешнем трехфазном к.з.;

$k_{Н} = 1{,}5$ - коэффициент надежности;

$\omega_{РАБ}$ - расчетное число витков обмотки насыщающегося трансформатора реле, к которой присоединена тормозная обмотка;

$tg\alpha$ - тангенс угла наклона касательной к оси абсцисс, проведенной из начала координат к характеристике срабатывания реле; при $F_{РАБ\,МАКС} = k_{Н} I_{НБ\,РАСЧ}\,\omega_{РАБ} \geq 200A$ можно принимать $tg\alpha = 0{,}75$.

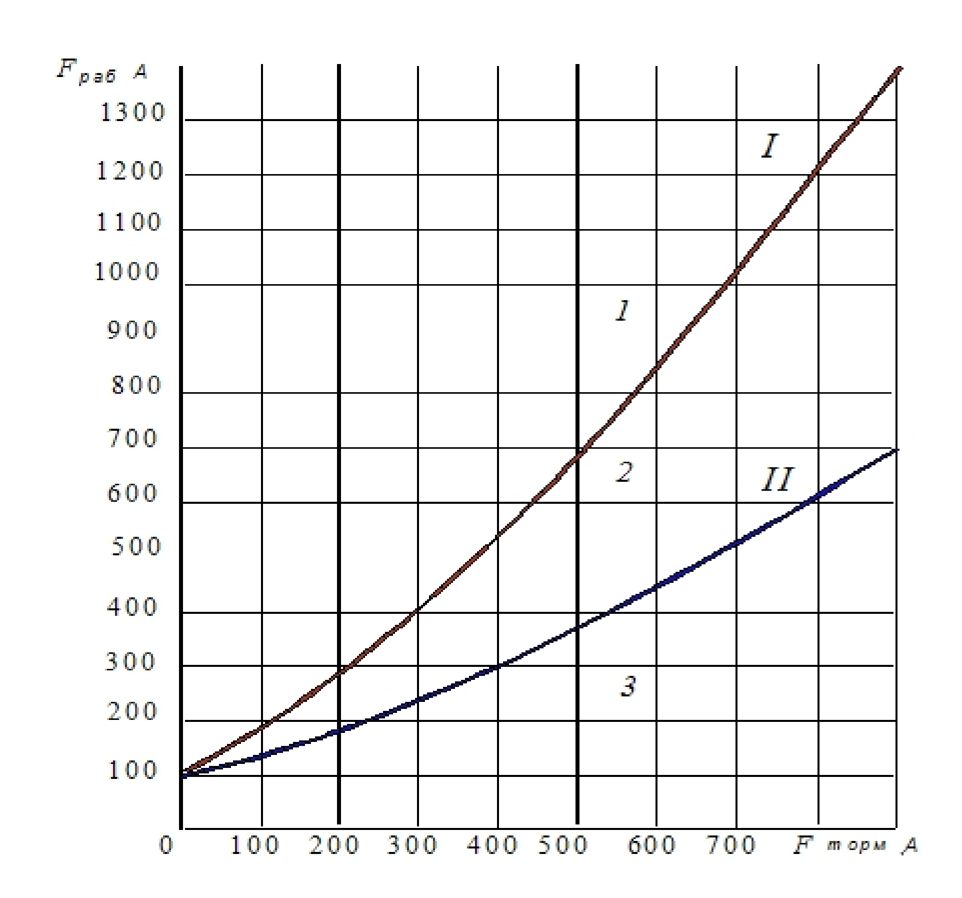


***Рис.12** Тормозные характеристики реле ДЗТ-11, ДЗТ-11/2, ДЗТ-11/3, ДЗТ-11/4: 1 - зона срабатывания; 2- зона срабатывания или торможения в зависимости от угла между рабочим и тормозным током; 3 - зона торможения; I - характеристика срабатывания, соответствующая максимальному торможению; II - характеристика срабатывания, соответствующая минимальному торможению*

В случае, когда $F_{РАБ\,МАКС} < 200A$, спрямление характеристики производится для расчетного участка. При этом характеристика срабатывания

заменяется прямой, соединяющей начало координат и точку пересечения прямой $F_{РАБ\ МАКС}$ с тормозной характеристикой реле.

6. Оценивается чувствительность защиты при повреждениях в защищаемой зоне, когда отсутствует торможение, по выражению

$$k_{Ч} = I_{Р\ ПОЛН} / I_{СР}.$$

В соответствие с ПУЭ требуемый коэффициент чувствительности должен быть не менее 2.

Допускается снижение коэффициента чувствительности до 1.5 в следующих случаях:

- при коротких замыканиях на выводах низшего напряжения трансформаторов мощностью менее 80 МВА ;
- в режиме включения трансформатора под напряжение;
- при коротком замыкании за реактором, установленном на стороне низшего напряжения и входящем в зону действия защиты.

7. Определяется коэффициент чувствительности защиты при внутренних повреждениях, когда имеется торможение. Расчетным является минимальный режим работы питающих систем и такой режим работы трансформатора, при котором возможно большая доля тока повреждения протекает через тормозную обмотку.

Чувствительность оценивается по выражению

$$k_{Ч\ ТОРМ} = \frac{F_{РАБ}}{F_{РАБ\ СР}}, \qquad (29)$$

где $F_{РАБ}$ - рабочая м.д.с. насыщающегося трансформатора реле при рассматриваемом коротком замыкании;

$F_{РАБ\ СР}$ - рабочая м.д.с. срабатывания реле в условиях, когда защита находится на грани срабатывания.

Рабочая намагничивающая сила насыщающегося трансформатора определяется по выражению

$$F_{РАБ} = \sum I_{РАБ\ ВТ} \omega_{РАСЧ\ ВТ}, \qquad (30)$$

где $I_{РАБ\ ВТ}$ - вторичные токи на отдельных сторонах с учетом их знака при рассматриваемом металлическом коротком замыкании;

$\omega_{РАСЧ\ ВТ}$ - число витков рабочих обмоток насыщающегося трансформатора реле, используемых на отдельных сторонах.

Рабочая намагничивающая сила срабатывания реле $F_{РАБ\ СР}$ определяется по характеристике срабатывания реле, соответствующей максимальному торможению следующим образом, *Рис.13:*

- определяется тормозная м.д.с. насыщающегося трансформатора реле при рассматриваемом металлическом к.з. по выражению

$$F_{ТОРМ} = I_{ТОРМ}\omega_{ТОРМ} \qquad (31)$$

- на плоскости $F_{РАБ}, F_{ТОРМ}$ наносится точка A, соответствующая параметрам, определенным по (30) и (31);

- проводится прямая, соединяющая эту точку с началом координат.

По точке пересечения A^I этой прямой с характеристикой срабатывания реле определяется $F_{РАБ\ СР}$.

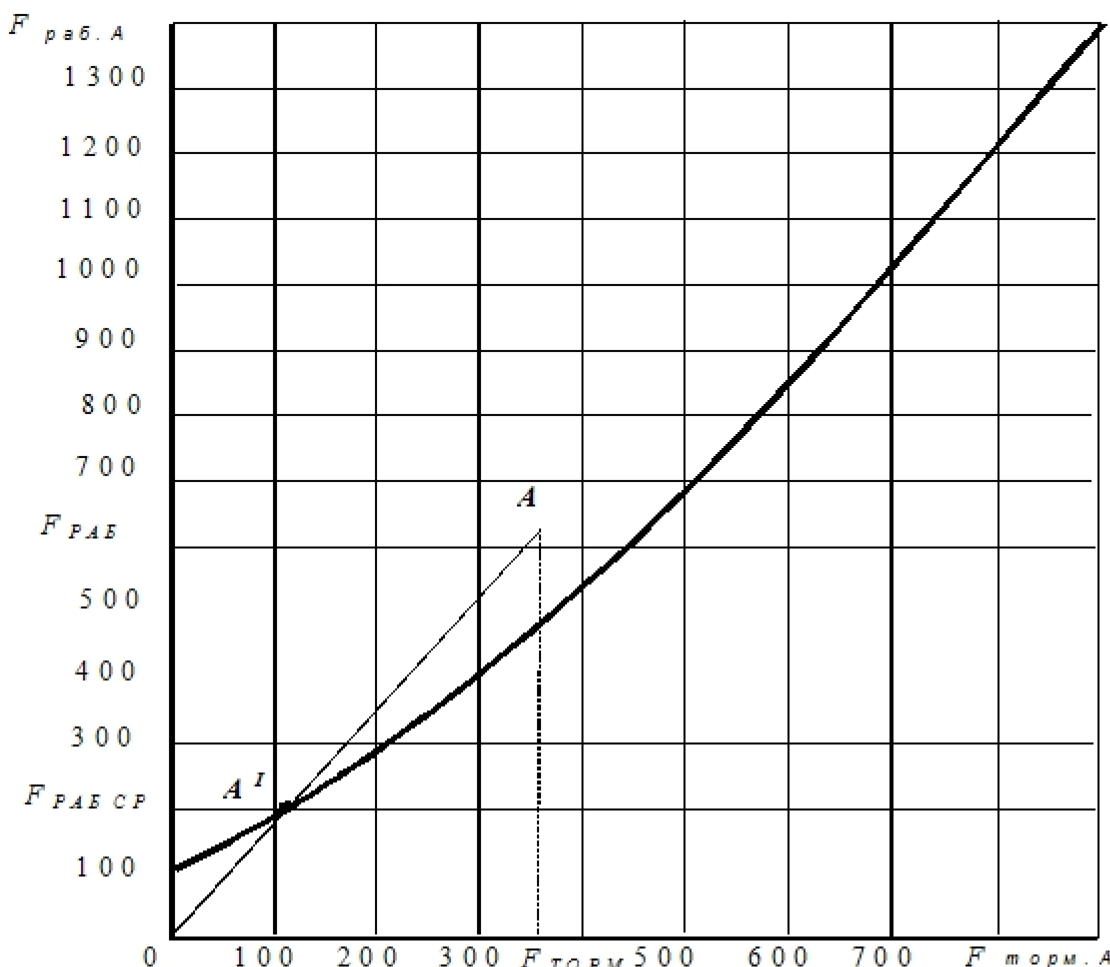


***Рис.13** Определение рабочей м.д.с. срабатывания реле по характеристике, соответствующей максимальному торможению*

В соответствии с ПУЭ минимальный коэффициент чувствительности допускается около двух.

Допускается снижение коэффициента чувствительности до значения 1.5 в тех же случаях, что и для защиты, выполненной на реле серии РНТ.

Пример расчета дифференциальной защиты, выполненной на реле типа ДЗТ-11

В примере дан расчет дифференциальной защиты понижающего трехобмоточного трансформатора мощностью 40 МВА напряжением 230/ 38.5/11 кВ. Трансформатор имеет встроенное регулирование на стороне высшего напряжения в пределах ± 12 % номинального и регулирование на стороне среднего напряжения в пределах $\pm 2\times2.5$ % . Трансформатор имеет питание со сторон 220 кВ и 35 кВ.

Исходная схема для примера расчета, а также схемы замещения прямой (обратной) последовательностей приведены на *Рис. 14.*

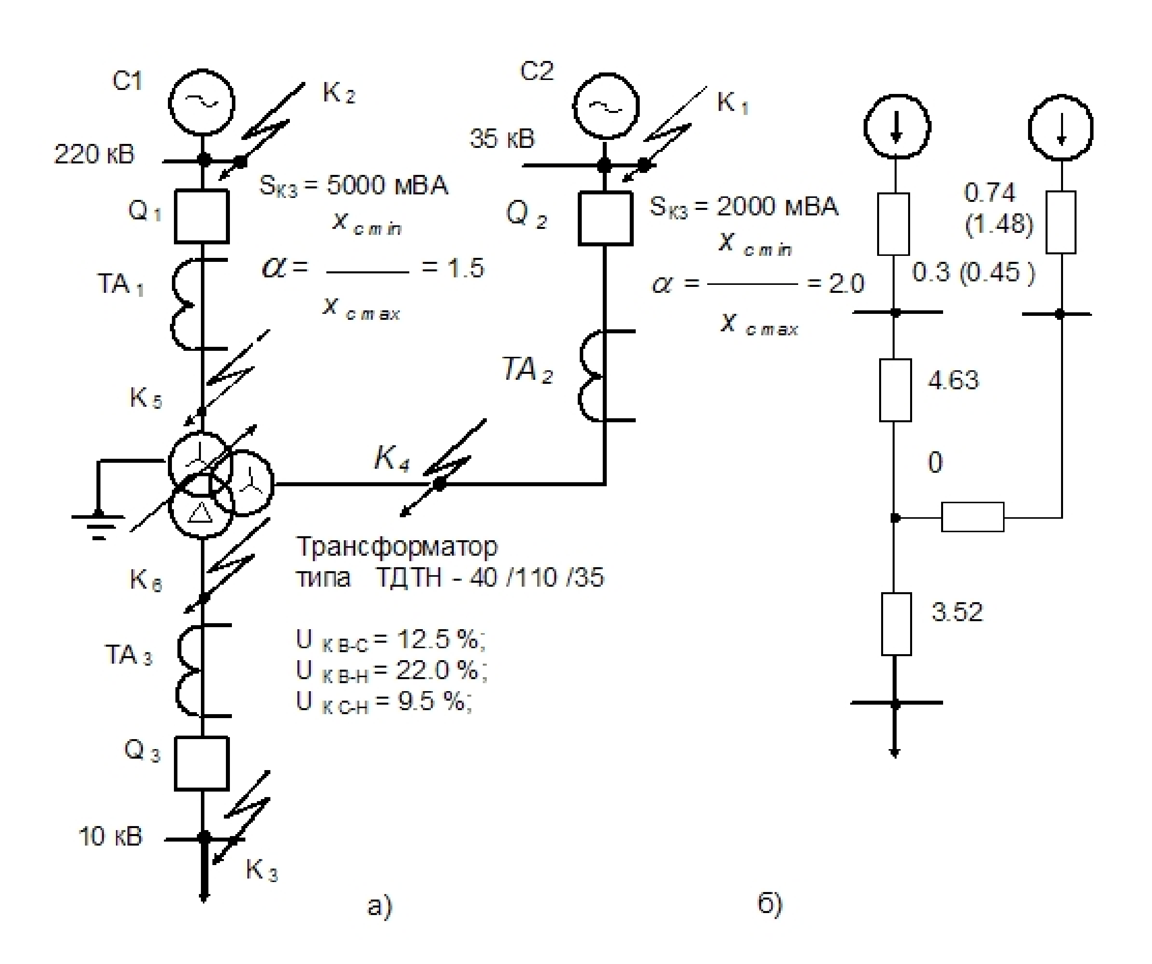


Рис.14 *Исходная схема и схема замещения трехобмоточного трансформатора. Сопротивления в схеме замещения приведены к напряжению 38.5 кВ, для системы в скобках указаны сопротивления в минимальном режиме*

Расчет производится в следующем порядке:

1. Определяются первичные токи силового трансформатора, выбираются трансформаторы тока и находятся соответствующие вторичные токи в плечах защиты. Трансформаторы тока выбираются таким образом, чтобы вторичные токи не превышали 5 А.

Расчеты приведены в *Табл. 6.*

Таблица 6

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовые значения для сторон		
		220 кВ	35 кВ	10 кВ
Первичные номинальные токи трансформатора, А	$I_{НОМ}=\frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3}U_{НОМ}}$	$\frac{40000}{\sqrt{3}\cdot 230}==100$	$\frac{40000}{\sqrt{3}\cdot 38,5}==600$	$\frac{40000}{\sqrt{3}\cdot 11}==2100$
Схема соединения трансформаторов тока		*Треугольник*	*Треугольник*	*Звезда*
Коэффициенты трансформации трансформаторов тока	$n_{ТТ}$	300/5	2000 / 5	3000 / 5
Вторичные токи в плечах защиты, А	$I_{НОМ\ ВТ}=\frac{k_{СХ}I_{НОМ}}{n_{ТТ}}$	$\frac{\sqrt{3}\cdot 100}{300/5}==2,89$	$\frac{\sqrt{3}\cdot 600}{2000/5}==2,6$	$\frac{2100}{3000/5}==3,5$

2. Выбирается место установки тормозной обмотки. Для этого, последовательно задаваясь местом установки тормозной обмотки на питающих сторонах, определяют максимальные токи к.з., проходящие через защищаемый трансформатор при внешнем коротком замыкании на стороне низшего напряжения. Сторона, на которой установлена тормозная обмотка, считается отключенной.

Полученные значения токов приведены на *Рис.15.*

Исходя из полученных токов, определяются соответствующие значения токов небаланса $I_{НБ\ РАСЧ}$ без учета составляющей $I_{НБ}'''$ и ориентировочные значения минимальных токов срабатывания защиты.

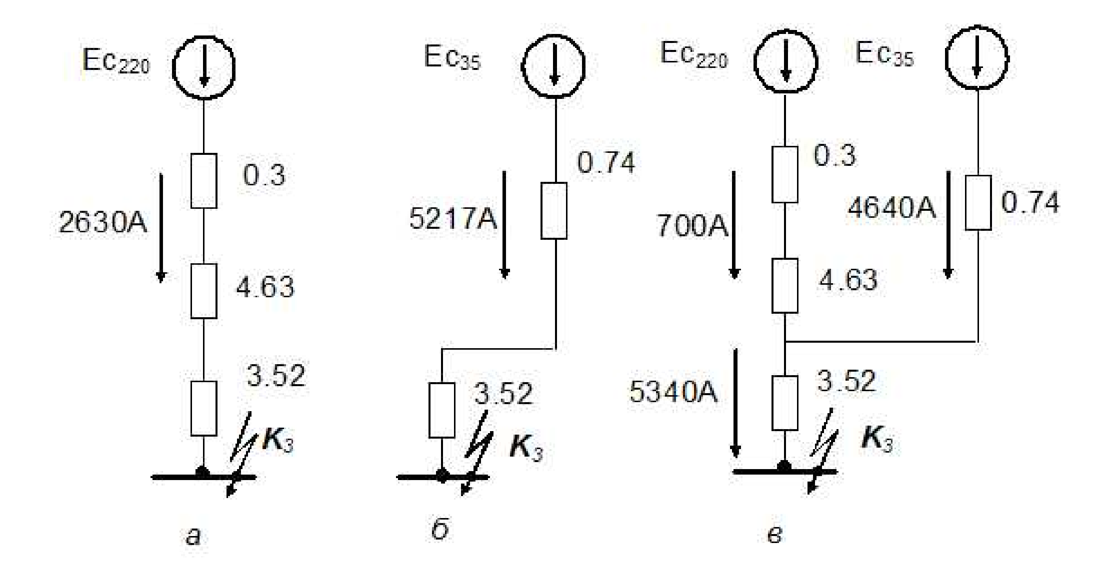


Рис.15 *Токи в трансформаторе при внешнем коротком замыкании:*
а) повреждение на стороне 10 кВ и выключенном выключателе на стороне 35 кВ; б) повреждение на стороне 10 кВ и выключенном выключателе на стороне 220 кВ; в) повреждение на стороне 10 кВ и включенных выключателях питающих сторон.

При установке тормозной обмотки на стороне 35 кВ *(Рис.15, а)*

$$I_{НБ\,РАСЧ} = (k_A k_{ОДН} f_I + \Delta U_{220})\,I_{КЗ\,МАКС} = (1 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,12)2630 = 579\,A.$$

Минимальный ток срабатывания защиты

$$I_{СЗ} \geq k_Н I_{НБ} = 1,5 \cdot 579 = 868\ A.$$

При установке тормозной обмотки на стороне 220 кВ *(Рис.15,б)*

$$I_{НБ\,РАСЧ} = (k_A k_{ОДН} f_I + \Delta U_{35})\,I_{КЗ\,МАКС} = (1 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,05) \cdot 5217 = 783\,A.$$

Минимальный ток срабатывания защиты

$$I_{СЗ} \geq k_Н I_{НБ} = 1,5 \cdot 783 = 1175\ A.$$

Минимальный ток срабатывания из условия отстройки от броска тока намагничивания

$$I_{СЗ} \geq k_Н I_{НОМ} = 1,5 \cdot 600 = 900\,A.$$

Из приведенных расчетов следует, что тормозную обмотку целесообразно присоединить к трансформаторам тока, установленным на стороне 35 кВ.

В качестве расчетного тока срабатывания защиты принимается значение $I_{СЗ} = 900\,A$.

3.Определяется число витков рабочей обмотки насыщающегося трансформатора реле для основной стороны 10 кВ (стороны с наибольшим вторичным током в плечах защиты) и число витков уравнительных обмоток для сторон 220 и 35 кВ.

Расчеты приведены в *Табл. 7.*

Таблица 7

№ п.п.	Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовые значения
1	*Расчетный ток срабатывания реле на основной стороне, А*	$I_{СР\,ОСН}=\dfrac{k_{СХ}I_{СЗ}\dfrac{U_{XX35}}{U_{XX10}}}{n_{ТТ10}}$	$\dfrac{900\dfrac{38,5}{11}}{3000/5}=$ $=5,25$
2	*Расчетное число витков обмотки насыщающегося трансформатора тока (НТТ) реле для основной стороны, витки*	$\omega_{ОСН\,РАСЧ}=\dfrac{F_{СР}}{I_{СР\,ОСН}}$	$\dfrac{100}{5,25}=19,05$
3	*Принятое число витков обмотки НТТ реле для основной стороны, витк*	$\omega_{ОСН}$	19
4	*Ток срабатывания реле на основной стороне, А*	$I_{СР\,ОСН}=\dfrac{F_{СР}}{\omega_{ОСН\,РАСЧ}}$	$\dfrac{100}{19}=5,26$
5	*Расчетное число витков обмотки насыщающегося трансформатора тока (НТТ) реле для стороны 220 кВ, витки*	$\omega_{I\,РАСЧ}=\omega_{ОСН}\dfrac{I_{ОСН\,ВТ}}{I_{1\,ВТ}}$	$19\dfrac{3,5}{2,89}=23,01$
6	*Принятое число витков обмотки НТТ реле для стороны 220 кВ, витки*	ω_{I}	23
7	*Расчетное число витков обмотки насыщающегося трансформатора тока (НТТ) реле для стороны 35 кВ, витки*	$\omega_{I\,РАСЧ}=\omega_{ОСН}\dfrac{I_{ОСН\,ВТ}}{I_{1\,ВТ}}$	$19\dfrac{3,5}{2,6}=25,6$
8	*Принятое число витков обмотки НТТ реле для стороны 35 кВ, витки*	ω	26

4. Выбирается необходимое число витков тормозной обмотки в соответствии с (28), для чего необходимо рассмотреть внешнее трехфазное к.з. на шинах *10 кВ*, *Рис. 15,в.* Расчетное число витков тормозной обмотки

$$\omega_{ТОРМ} \geq k_{Н} \frac{I_{НБ\ РАСЧ}\omega_{РАБ}}{I_{ТОРМ} tg\alpha}$$

$$I_{НБ\ РАСЧ} = I'_{НБ\ РАСЧ} + I''_{НБ\ РАСЧ} + I'''_{НБ\ РАСЧ}$$

$$I'_{НБ\ РАСЧ} = 1 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot (700 + 4640) = 534 A;$$

$$I''_{НБ\ РАСЧ} = 0,12 \cdot 700 + 0,05 \cdot 4640 = 316 A;$$

$$I'''_{НБ\ РАСЧ} = \frac{|25,6 - 25|}{25,6} \cdot 4640 = 73 A;$$

$$I_{НБ\ РАСЧ} = 534 + 316 + 73 = 923 A;$$

$$\omega_{ТОРМ\ РАСЧ} = \frac{1,5 \cdot 923 \cdot 25,6}{4640 \cdot 0,75} = 10,2.$$

Принимается ближайшее значение $\omega_{ТОРМ} = 11$ *витков*.

4.Определяется чувствительность защиты при внутренних повреждениях, когда отсутствует торможение. Рассматривается замыкание между двумя фазами на стороне *10 кВ*, когда выключатель на стороне *110 кВ* отключен, *Рис. 16, а.*

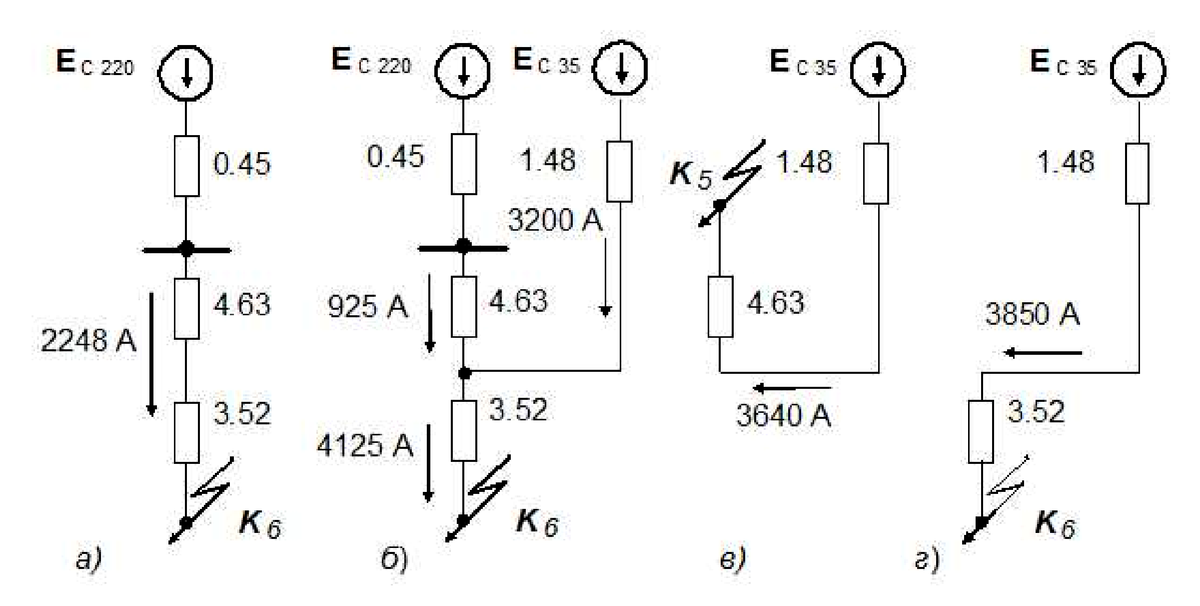


Рис.16 *Токи в трансформаторе при внутренних к.з*

Вторичный ток, подводимый к рабочей обмотке насыщающегося трансформатора реле на стороне *220 кВ*

$$I_{РАБ\ 1В} = \frac{2248\dfrac{38,5}{230}\sqrt{3}}{300/5} = 10,9A.$$

Коэффициент чувствительности

$$k_ч = \frac{10,9 \cdot 23}{100} = 2,5.$$

6. Определяется чувствительность при наличии торможения:

а) Рассматривается двухфазное к.з. на стороне *10 кВ* в зоне действия защиты в минимальном режиме работы систем *220* и *35 кВ*, *Рис. 16, б.*

Вторичный ток, подводимый к рабочей обмотке насыщающегося трансформатора реле на стороне *220 кВ*

$$I_{РАБ\ 1В} = \frac{925\dfrac{38,5}{230}\sqrt{3}}{300/5} = 4,47A.$$

Вторичный ток, подводимый к рабочей обмотке насыщающегося трансформатора реле на стороне *35 кВ*

$$I_{РАБ\ 1В} = \frac{3200\sqrt{3}}{2000/5} = 13,86A.$$

$$F_{РАБ} = I_{РАБ\ 1В}\omega_1 + I_{РАБ\ 2В}\omega_2 = 4,47 \cdot 23 + 13,86 \cdot 26 = 463A.$$

$$F_{ТОРМ} = 13,86 \cdot 11 = 153A.$$

По характеристике срабатывания реле определяется $F_{РАБ\ СР} = 145A$, соответствующая точке пересечения прямой ***OA*** с характеристикой срабатывания реле, *Рис.17.*

$$k_{ч\ ТОРМ} = \frac{463}{153} = 3 > 2.$$

б) Рассматривается трехфазное к.з. на стороне 220 кВ при отключенном выключателе с этой стороны в минимальном режиме работы системы *35 кВ, Рис. 16, в.*

Вторичный ток, подводимый к рабочей обмотке насыщающегося трансформатора реле на стороне *35 кВ*

$$I_{РАБ\ 2В} = \frac{3640\sqrt{3}}{2000/5} = 15,8A.$$

$$F_{РАБ} = I_{РАБ\ 2В}\omega_2 = 15{,}8 \cdot 26 = 411A.$$

$$F_{ТОРМ} = 15{,}8 \cdot 11 = 174A.$$

По характеристике срабатывания реле определяется $F_{РАБ\ СР} = 170A$, соответствующая точке пересечения прямой ***ОВ*** с характеристикой срабатывания реле, *Рис.17*.

$$k_{Ч\ ТОРМ} = \frac{411}{170} = 2{,}4 > 2.$$

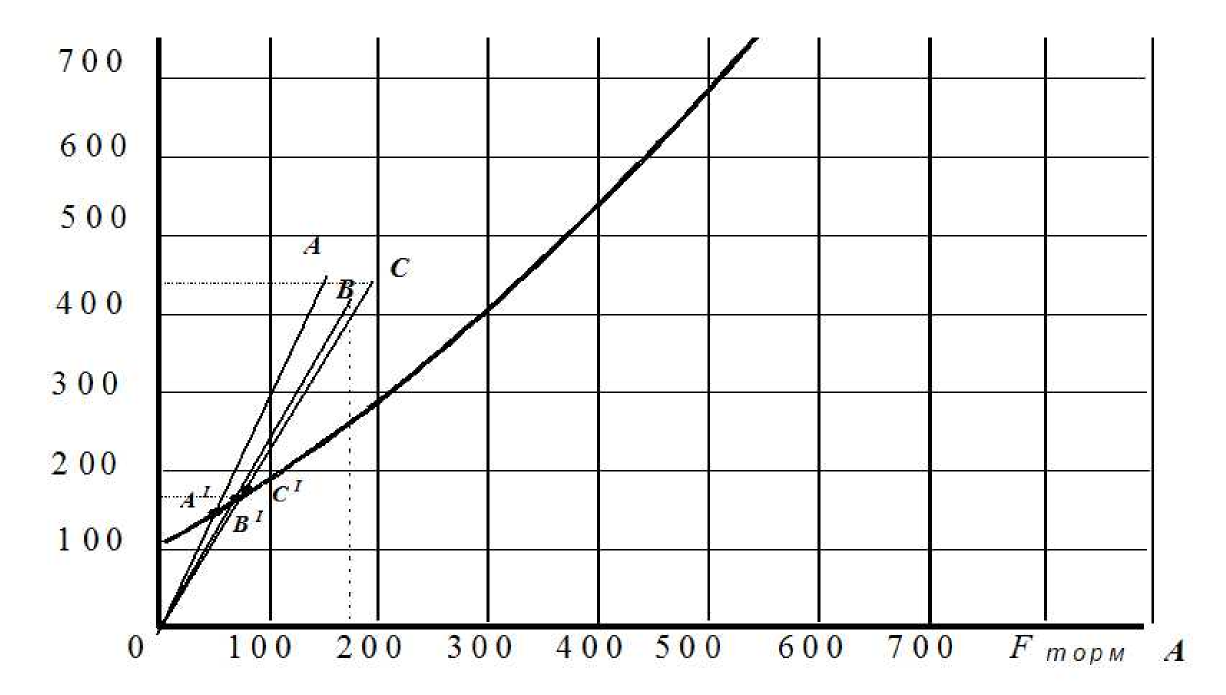


Рис.17 *Расчет чувствительности защиты трансформатора*

в) Рассматривается двухфазное к.з. на стороне *10 кВ* при отключенном выключателе со стороны *220 кВ* в минимальном режиме работы системы *35 кВ, Рис. 16, г.*

Вторичный ток, подводимый к рабочей обмотке насыщающегося трансформатора реле на стороне *35 кВ*.

$$I_{РАБ\ 2В} = \frac{3850\sqrt{3}}{2000/5} = 16{,}7A;$$

$$F_{РАБ} = I_{РАБ\ 2В}\omega_2 = 16{,}7 \cdot 26 = 434A;$$

$$F_{ТОРМ} = 16{,}7 \cdot 11 = 183A.$$

По характеристике срабатывания реле определяется $F_{РАБ\ СР} = 176A$; соответствует точке пересечения прямой ***ОС*** с характеристикой срабатывания реле, *Рис.17*.

$$k_{ч\ торм} = \frac{434}{176} = 2{,}5 > 2.$$

Как следует из приведенных расчетов, во всех рассмотренных случаях защита имеет достаточную чувствительность.

3.2.4 Дифференциальная токовая защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов с реле типа ДЗТ 21

Реле типа ДЗТ-21 обладает более высокой чувствительностью, быстродействием и потребляет меньшую мощность по сравнению с реле типа ДЗТ-11. Для отстройки от бросков намагничивающего тока силовых трансформаторов и переходных токов небаланса применяется время-импульсный способ блокирования защиты в сочетании с торможением от составляющей второй гармоники тока намагничивания. В защите предусмотрено также торможение от фазных токов.

Реле ДЗТ-21 выполнено трехфазным в четырехмодульной кассете и включает в себя три фазных модуля и модуль питания и управления. Однолинейная структурная схема защиты приведена на *Рис.18*. На ней представлены: промежуточные автотрансформаторы ***TL1*** и ***TL2*** - для выравнивания вторичных токов; промежуточные трансформаторы ***TL3*** и ***TL4*** и выпрямители ***VS1*** и ***VS2*** - для формирования цепи торможения от фазных токов, стабилитрон ***VD*** обеспечивает запрет торможения при небольших токах; трансреактор ***TAV*** - для формирования цепи торможения током второй гармоники при помощи фильтра ***ZF*** и питания токовой отсечки ***КА***; реагирующий орган ***РО*** - для создания управляющего сигнала.

Расчет дифференциальной защиты с реле ДЗТ-21 заключается в:

- определении тока срабатывания защиты;
- выборе ответвлений трансреактора ***TAV*** рабочей цепи реле и, при необходимости, варианте включения промежуточных автотрансформаторов ***TL1*** и ***TL2***;
- выборе ответвлений промежуточных трансформаторов тока ***TL3*** и ***TL4*** цепи торможения при внешних замыканиях;
- определении тока, соответствующего началу торможения, и коэффициента торможения;
- выборе тока срабатывания отсечки.

Для расчета дифференциальной защиты с реле типа ДЗТ-21 рекомендуется следующий порядок расчета:

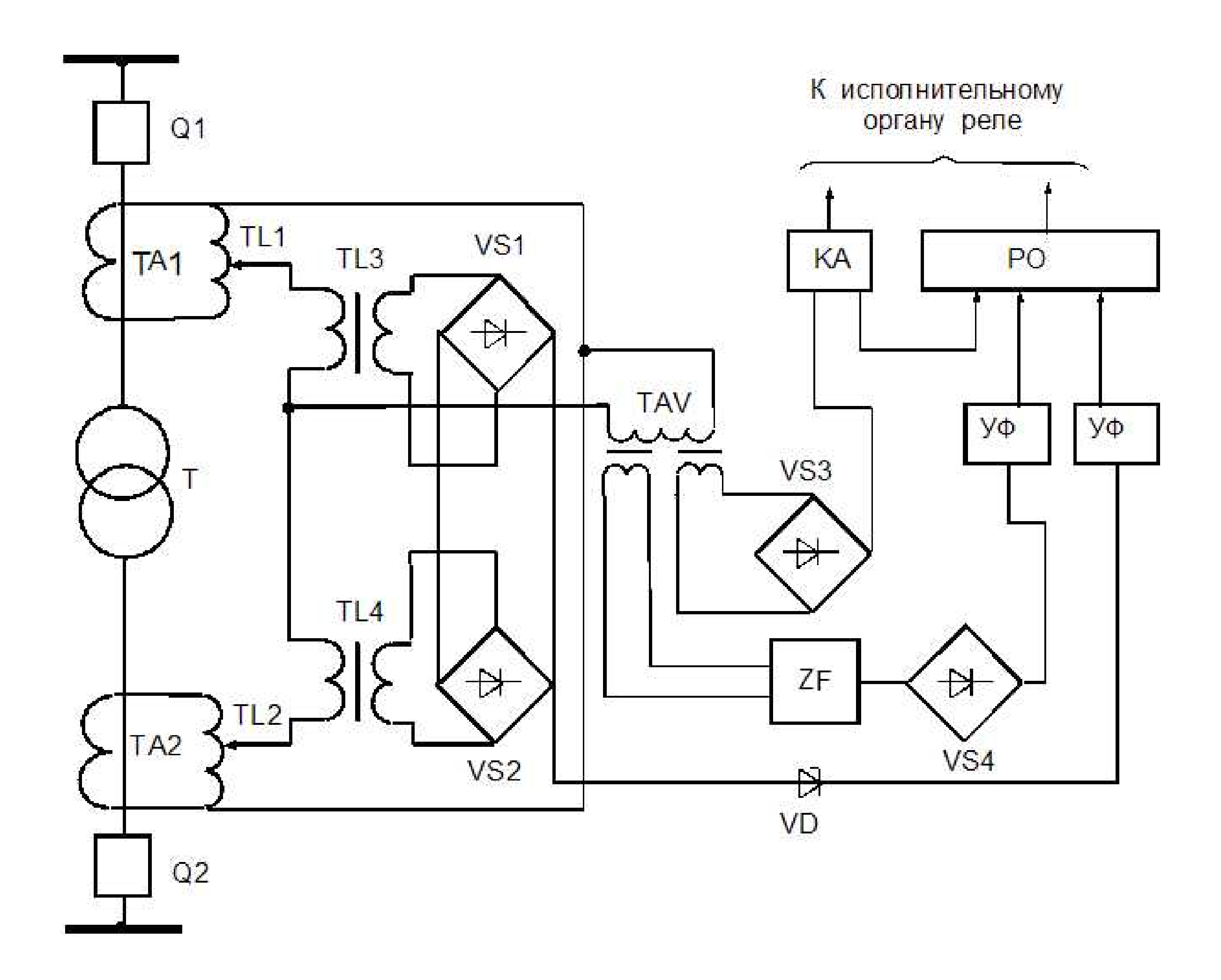


Рис.18 *Однолинейная структурная схема защиты ДЗТ-21*

1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора, соответствующие его номинальной мощности, и выбираются трансформаторы тока на всех сторонах защищаемого трансформатора.

2. Выбираются ответвления трансреактора ***TAV*** для основной стороны. За основную можно принять любую из сторон защищаемого трансформатора. Номинальные токи ответвлений трансреактора находятся в пределах (2.5 - 5) *А, Табл.8,* поэтому, если вторичные токи выходят за эти пределы, необходимо использовать промежуточные автотрансформаторы ***TL1*** или ***TL2*** .

Выравнивающие автотрансформаторы выпускаются двух типов:

1) если вторичный ток меньше 2.5 *А* - используется АТ - 31;

2) при вторичный токах больше 5 *А* применяется АТ - 32.

Таблица 8

1.Номер ответвления	1	2	3	4	5	6
2.Номинальный ток ответвления, $I_{НОМ\ ОТВ}$, А	5	4.6	4.25	3.63	3.0	2.5

Схема внутренних соединений выравнивающих автотрансформаторов приведена на *Рис.19.*

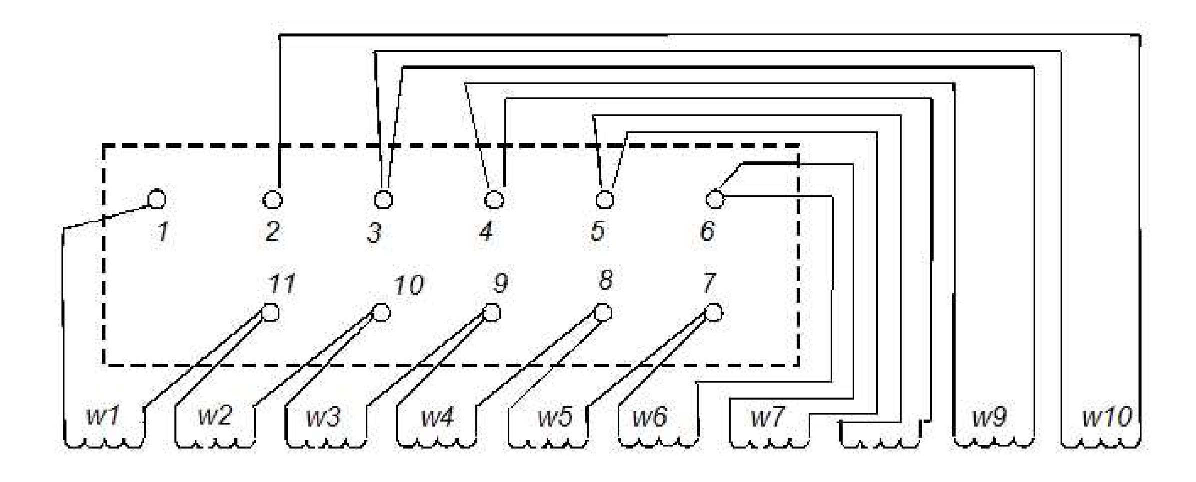


Рис.19 *Схема выравнивающих автотрансформаторов*

Требуемое ответвление выбирается исходя из следующего:

$I_{ОТВ\ TAV\ ОСН} \le I_{НОМ\ ВТ\ ОСН}$ - без применения выравнивающего автотрансформатора;

$I_{ОТВ\ TAV\ ОСН} \le I_{НОМ\ ВТ\ ОСН} / n_{АТ}$ - с использованием выравнивающего автотрансформатора;

$n_{АТ}$ - коэффициент трансформации выравнивающего автотрансформатора.

Для определения $n_{АТ}$ рассчитывается 6 значений (по числу стандартных ответвлений трансреактора ***TAV***)

$$n_{АТ\ РАСЧ} = \frac{I_{НОМ\ ВТ\ ОСН}}{I_{ОТВ\ TAV\ ОСН}}$$

и определяется ближайшее стандартное значение из *Табл.9.*

3. Выбираются ответвления трансреактора ***TAV*** для неосновной стороны по выражению:

Таблица 9

Значение коэффициента трансформации АТ-31	Номера ответвлений, используемых для подключения трансформаторов тока	Номера ответвлений, используемых для подключения реле	Значение коэффициента трансформации АТ-32	Номера ответвлений, используемых для подключения трансформаторов тока	Номера ответвлений, используемых для подключения реле
0.13	*1 - 2*	*1 - 11*	*1.08*	*1 - 4*	*1 - 3*
0.15	*1 - 2*	*1 - 10*	*1.09*	*1 - 3*	*1 - 2*
0.16	*1- 2*	*1 - 9*	*1.18*	*1 - 4*	*1 - 2*
0.17	*1 - 3*	*1 - 11*	*1.25*	*1 - 11*	*1 - 10*
0.19	*1 - 3*	*1 - 10*	*1.27*	*1 - 7*	*1 - 6*
0.20	*1 - 3*	*1 - 9*	*1.28*	*1 - 8*	*1 - 7*
0.22	*1 - 3*	*1 - 8*	*1.29*	*1 - 5*	*1 - 4*
0.23	*1 - 4*	*1 - 11*	*1.39*	*1 - 5*	*1 - 3*
0.25	*1 - 4*	*1 - 10*	*1.52*	*1 - 5*	*1 - 2*
0.27	*1 - 4*	*1 - 9*	*1.56*	*1 - 11*	*1 - 9*
0.29	*1 - 4*	*1 - 8*	*1.60*	*1 - 10*	*1 - 8*
0.30	*1 - 3*	*1 - 7*	*1.61*	*1 - 7*	*1 - 5*
0.31	*1 - 5*	*1 - 11*	*1.62*	*1 - 8*	*1 - 6*
0.34	*1 - 5*	*1 - 10*	*1.63*	*1 - 6*	*1 - 4*
0.36	*1 - 5*	*1 - 9*	*1.64*	*1 - 9*	*1 - 7*
0.39	*1 - 5*	*1 - 8*	*1.77*	*1 - 6*	*1 - 3*
0.40	*1 - 4*	*1 - 7*	*1.92*	*1 - 6*	*1 - 2*
0.43	*1 - 2*	*1 - 5*	*2.00*	*1 - 11*	*1 - 8*
0.44	*1 - 6*	*1 - 11*	*2.05*	*1 - 10*	*1 - 7*
0.48	*1 - 6*	*1 - 10*	*2.06*	*1 - 8*	*1 - 5*
0.52	*1 - 6*	*1 - 9*	*2.07*	*1 - 7*	*1 - 4*
0.53	*1 - 5*	*1 - 7*	*2.08*	*1 - 9*	*1 - 6*
0.56	*1 - 6*	*1 - 8*	*2.24*	*1 - 7*	*1 - 3*
0.58	*1 - 7*	*1 - 11*	*2.44*	*1 - 7*	*1 - 2*
0.63	*1 - 7*	*1 - 10*	*2.56*	*1 - 11*	*1 - 7*
0.68	*1 - 7*	*1 - 10*	*2.60*	*1 - 10*	*1 - 6*
0.70	*1 - 5*	*1 - 6*	*2.64*	*1 - 9*	*1 - 5*
0.74	*1 - 7*	*1 - 8*	*2.66*	*1 - 8*	*1 - 4*
0.75	*1 - 4*	*1 - 5*	*2.87*	*1 - 8*	*1 - 3*
0.76	*1 - 6*	*1 - 7*	*3.13*	*1 - 8*	*1 - 2*
0.77	*1 - 2*	*1 - 3*	*3.25*	*1 - 11*	*1 - 6*
0.79	*1 - 8*	*1 - 11*	*3.30*	*1 - 10*	*1 - 5*
0.85	*1 - 9*	*1 - 11*	*3.40*	*1 - 9*	*1 - 4*
0.86	*1 – 8*	*1 – 10*	*3.68*	*1 - 9*	*1- 3*
0,92	*1 - 10*	*1 – 11*	*4.00*	*1 - 9*	*1 - 2*
0,93	*1 - 9*	*1 - 9*	*4.13*	*1 - 11*	*1 - 5*
			4.25	*1 - 10*	*1 - 4*
			4.60	*1 - 10*	*1 - 3*
			5.00	*1 - 10*	*1 - 2*
			5.31	*1 - 11*	*1 - 4*
			5.75	*1 - 11*	*1 - 3*
			6.25	*1 - 11*	*1 - 2*

$$I_{ОТВ\,TAV\,НЕОСН} \le I_{ОТВ\,TAV\,ОСН}\,\frac{I_{НОМ\,ВТ\,ОСН}}{I_{НОМ\,ВТ\,НЕОСН}}$$ - без применения выравнивающего автотрансформатора;

$$I_{ОТВ\,TAV\,НЕОСН} \le I_{ОТВ\,TAV\,ОСН}\,\frac{I_{НОМ\,ВТ\,ОСН}}{I_{НОМ\,ВТ\,НЕОСН}}\Big/ n_{AT}$$ - с использованием выравнивающего автотрансформатора;

n_{AT} - коэффициент трансформации выравнивающего автотрансформатора.

Если расчетное значение $I_{ОТВ\ TAV\ НЕОСН}$ отличается от номинального значения тока ответвления трансреактора в целой части или в первом знаке после запятой, то для этой стороны требуется установка выравнивающего автотрансформатора. Выбор ответвлений у автотрансформатора производится аналогично рассмотренному выше.

4. Определяются стороны, на которых целесообразно использовать торможение. Как правило, торможение следует осуществлять от токов всех сторон защищаемого трансформатора.

5.Выбирается уставка " начала торможения " $I_{*ТОРМ\ НАЧ}$, *Рис.20.* Значение уставки принимается равным $I_{*ТОРМ\ НАЧ} = 1$ торможении от всех групп трансформаторов тока или $I_{*ТОРМ\ НАЧ} = 0{,}6$, когда торможение осуществляется только от приемных сторон.

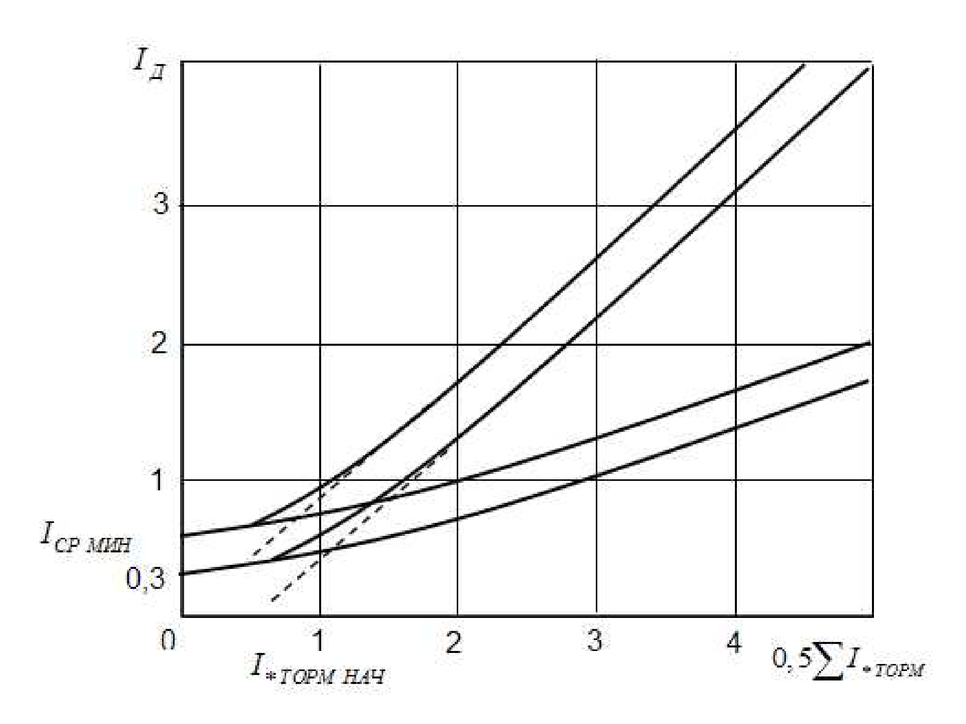


Рис.20 *Тормозные характеристики реле типа ДЗТ - 21.*

6. Выбираются ответвления промежуточных трансформаторов ***TL3*** и ***TL4*** цепи торможения и приставки дополнительного торможения при ее использовании из условия

$$I_{ОТВ\ ТОРМ\ РАСЧ} \leq I_{НОМ\ ВТ} / n_{АТ}$$

Если на рассматриваемой стороне выравнивающий автотрансформатор не используется, то $n_{АТ}$ следует принять равным единице.

Номера используемых ответвлений и значения их номинальных токов приведены в *Табл.10*

Таблица 10

1.Номер ответвления	1	2	3	4
2.Номинальный ток ответвления, $I_{НОМ\ ОТВ}$ *, А*	5	3.75	3.0	2.50

Полученное расчетное значение округляется до ближайшего номинального.

7. Определяется ток срабатывания защиты. Первичный минимальный ток срабатывания защиты выбирается из двух условий:

а) по условию отстройки от броска тока намагничивания при включении трансформатора под напряжение

$$I_{СЗ} \geq 0{,}3 \times I_{НОМ}.$$

б) по условию отстройки от расчетного тока небаланса в режиме, соответствующем "началу торможения "

$$I_{СЗ} \geq k_Н I_{НБ\ ТОРМ\ НАЧ} = k_Н (I'_{НБ\ ТОРМ\ НАЧ} + I''_{НБ\ ТОРМ\ НАЧ} + I'''_{НБ\ ТОРМ\ НАЧ}),$$

где

$k_Н = 1{,}5$	- коэффициент надежности;
$I'_{НБ\ ТОРМ\ НАЧ}$	- составляющая, обусловленная погрешностью трансформаторов тока;
$I''_{НБ\ ТОРМ\ НАЧ}$	- составляющая, обусловленная наличием РПН у силового; трансформатора;
$I'''_{НБ\ ТОРМ\ НАЧ}$	- составляющая, обусловленная несовпадением расчетных и номинальных токов принятых ответвлений промежуточных автотрансформаторов или трансреакторов для неосновных сторон;

$$I'_{НБ\ ТОРМ\ НАЧ} = k_А k_{ОДН} f_i I_{ТОРМ\ НАЧ};$$

$$I''_{НБ\ ТОРМ\ НАЧ} = (\Delta U_1 k_{ТОК1} + \Delta U_2 k_{ТОК2}) I_{ТОРМ\ НАЧ};$$

$$I'''_{НБ\,ТОРМ\,НАЧ} = \left| \frac{I_{1\,ОТВ\,РАСЧ} - I_{1\,ОТВ\,НОМ}}{I_{1\,ОТВ\,РАСЧ}} - \frac{I_{2\,ОТВ\,РАСЧ} - I_{2\,ОТВ\,НОМ}}{I_{2\,ОТВ\,РАСЧ}} \right| I_{ТОРМ\,НАЧ};$$

$k_A = 1;$ - коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей

$k_{ОДН} = 0,5 - 1;$ - коэффициент однотипности трансформаторов тока;

$f_i = 0,05;$ - допустимая погрешность трансформаторов тока в относительных единицах;

ΔU_1, ΔU_2 - половина диапазона регулирования РПН для сторон трансформатора, %;

$I_{ТОРМ\,НАЧ}$ - первичный ток, соответствующий началу торможения, для уставки «начала торможения» равной 1,0;

$$I_{ТОРМ\,НАЧ} = 0,5 I_{НОМ} \left(k_{ТОК1} \frac{I_{1\,ОТВ\,ТОРМ\,НОМ}}{I_{1\,ОТВ\,ТОРМ\,РАСЧ}} + k_{ТОК2} \frac{I_{2\,ОТВ\,ТОРМ\,НОМ}}{I_{2\,ОТВ\,ТОРМ\,РАСЧ}} + \right.$$

$$\left. + k_{ТОК3} \frac{I_{3\,ОТВ\,ТОРМ\,НОМ}}{I_{3\,ОТВ\,ТОРМ\,РАСЧ}} \right);$$

$k_{ТОК1}, k_{ТОК2}, k_{ТОК3}$ - коэффициенты токораспределения.

Из двух полученных значений выбирается большее.

8. Определяется относительный минимальный ток срабатывания реле при отсутствии торможения

$$I_{*\,СР} = \frac{I_{СЗ} k_{СХ}}{n_{ТТ} I_{ОТВ\,НОМ}}.$$

Все величины в выражении должны приниматься для неосновной стороны, которая имеет наибольшую разницу между расчетным и принятым токами ответвления и со стороны которой может быть произведено включение трансформатора.

9.Определяется значение коэффициента торможения. Его значение может быть принят равным 0.9, что в большинстве случаев достаточно для отстройки защиты от внешних замыканий.

Точное значение коэффициента торможения определяется по выражению

$$k_{ТОРМ} = \frac{k_H I_{*НБ} \dfrac{I_{НОМ\,ВТ\,ОСН}}{I_{ОТВ\,НОМ\,ОСН}} - I_{*СР}}{0,5 \sum I_{*ТОРМ\,РАСЧ} \dfrac{I_{ОТВ\,ТОРМ\,РАСЧ}}{I_{ОТВ\,ТОРМ\,НОМ}} - I_{*ТОРМ\,НАЧ}},$$

где

$k_{Н} = 1{,}5$	- коэффициент надежности;
$I_{*НБ}$	- относительное значение тока небаланса, протекающего через защиту при расчетном внешнем коротком замыкании;
$0{,}5\sum I_{*ТОРМ\ РАСЧ}$	- полусумма первичных относительных токов при расчетном внешнем коротком замыкании.

10. Принимается ток срабатывания отсечки равным $6I_{НОМ}$, если ответвления рабочей цепи примерно равны вторичным токам; в противном случае - $9I_{НОМ}$.

11.Чувствительность защиты можно не проверять, так как согласно ПУЭ она всегда выше требуемой.

Пример расчета дифференциальной токовой защиты, выполненной на реле типа ДЗТ - 21

В примере дан расчет дифференциальной токовой защиты автотрансформатора 230/121/11 кВ мощностью 63 МВА. Автотрансформатор имеет встроенное регулирование напряжения под нагрузкой на стороне среднего напряжения в пределах ± 12 %.

Исходная схема для примера расчета и схема замещения прямой (обратной) последовательности приведена на *Рис.21.*

Расчет защиты производится в следующем порядке:

1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого автотрансформатора, выбираются трансформаторы тока и определяются вторичные токи в плечах защиты. Расчеты сведены в *Табл.11.*

2. Выбираются ответвления трансреактора для основной сторон. За основную принимается сторона *220 кВ.*

3. Принимаются ответвления трансреактора для неосновных сторон *110* и *10 кВ.*

Расчеты представлены в *Табл. 12, п. 1 - 4.*

4.Для выполнения торможения принимается торможение от токов всех сторон защищаемого трансформатора.

5. Выбирается уставка " начала торможения ", $I_{*\,ТОРМ\ НАЧ} = 1$

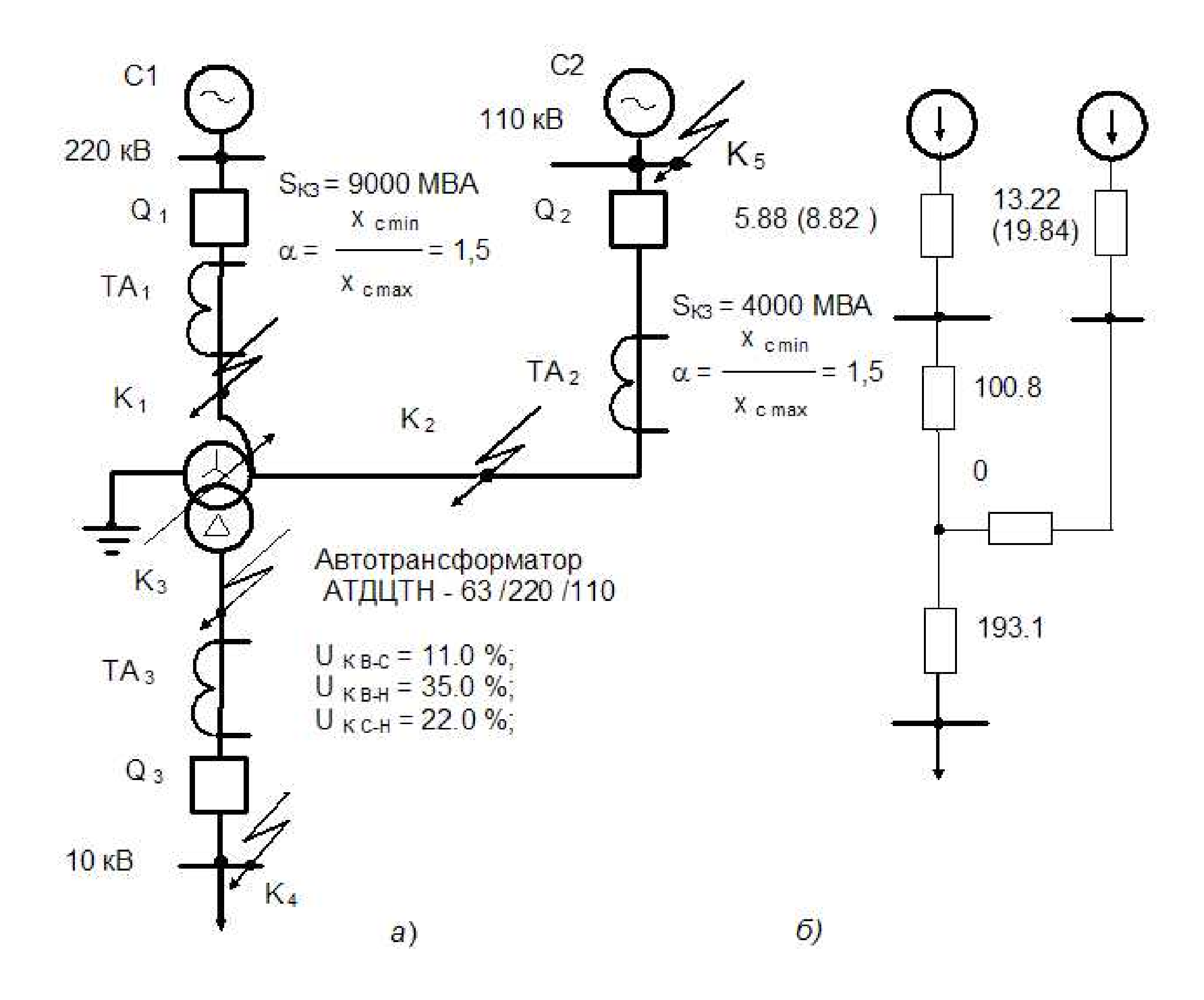


***Рис.21** Исходная схема и схема замещения автотрансформатора. Сопротивления в схеме замещения приведены к напряжению 230 кВ, для системы в скобках указаны сопротивления в минимальном режиме*

Таблица 11

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовые значения для сторон		
		220 кВ	110 кВ	10 кВ
Первичные номинальные токи автотрансформатора, А	$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \times U_{ном}}$	$\frac{63000}{\sqrt{3}\cdot 230} = 158$	$\frac{63000}{\sqrt{3}\cdot 121} = 301$	$\frac{63000}{\sqrt{3}\cdot 11} = 3307$
Схема соединения трансформаторов тока		*Треугольник*	*Треугольник*	*Звезда*
Коэффициенты трансформации трансформаторов тока	n_{TT}	$300/5$	$800/5$	$5000/5$

Вторичные токи в плечах защиты, А	$I_{НОМ\ ВТ} = \dfrac{I_{НОМ} \times k_{СХ}}{n_{ТТ}}$	$\dfrac{158 \cdot \sqrt{3}}{300} = 4,56$	$\dfrac{301 \cdot \sqrt{3}}{800/5} = 3,26$	$\dfrac{3307}{5000/5} = 3,31$

6. Выбираются ответвления промежуточных трансформаторов тока и приставки дополнительного торможения.

Расчеты сведены в *Табл. 12, п. 5-7*

Таблица 12

Наименование величины	Обозначение и метод определения	Числовые значения для сторон		
		220 кВ	110 кВ	10 кВ
1. Номинальный ток принятого ответвления трансреактора на основной стороне, А	$I_{ОТВ\ TAV\ ОСН} \le \le I_{НОМ\ ВТ\ ОСН}$	$4,25$	-	-
2. Расчетный ток для выбора ответвлений трансреактора на неосновных сторонах	$I_{ОТВ\ TAV\ НЕОСН} \le \le I_{ОТВ\ TAV\ ОСН} \times \times \dfrac{I_{НОМ\ ВТ\ НЕОСН}}{I_{НОМ\ ВТ\ ОСН}}$	-	$4,25\dfrac{3,26}{4,56} = 3,04$	$4,25\dfrac{3,31}{4,56} = 3,08$
3.Номинальные токи принятых ответвлений трансреактора на неосновных сторонах, А	Табл. 8		3.0	3.0
4. Номера используемых ответвлений трансреактора реле	Табл. 8	3	5	5
5. Расчетный ток ответвления промежуточных трансформаторов ПТ цепи торможения, А	$I_{ОТВ\ ТОРМ\ ОСН} \le \le I_{НОМ\ ВТ\ ОСН}$	4.56	3.26	3.31
6. Принятый ток ответвления промежуточных трансформаторов ПТ цепи торможения, А	Табл. 10	5.0	3.0	3.0
7. Принятые ответвления ПТ цепи торможения	Табл. 10	1	3	3

7. Определяется ток срабатывания защиты:

а) по условию отстройки от броска тока намагничивания при включении трансформатора под напряжение

$$I_{СЗ} = 0,3 \cdot 158 = 48A.$$

б) по условию отстройки от расчетного тока небаланса, соответствующего "началу торможения"

$$I_{ТОРМ\ НАЧ} = 0,5 \cdot 158 \cdot \left(\frac{5}{4,56} \cdot 1 + \frac{3}{3,26} \cdot 1 \right) = 159,6A;$$

$$I_{НБ\ ТОРМ\ НАЧ} = \left(1 \cdot 1 \cdot 0,05 + 0,12 + \frac{3,04 - 3}{3,0} \right) \cdot 159,6 = 28,7A;$$

$$I_{СЗ} = 1,5 \cdot 28,7 = 43,1A.$$

За расчетное принимается ближайшее большее $I_{СЗ} = 48A$.

8. Определяется относительный минимальный ток срабатывания реле при отсутствии торможения

$$I_{*СР} = \frac{48 \dfrac{230}{121} \sqrt{3}}{800/5 \cdot 3,0} = 0,33.$$

9. Принимается значение коэффициента торможения, равное 0.9.

10. Принимается ток срабатывания отсечки.

11. Чувствительность защиты согласно ПУЭ можно не проверять.

3.2.5 Дифференциальная токовая защита понижающих трансформаторов с реле типа РСТ 15

Реле типа РСТ 15 выполнено на микроэлектронной основе и применяется для защиты понизительных трансформаторов для случаев, когда не требуется торможение.

Расчет защиты на такого типа измерительном органе заключается в определении тока срабатывания, числа витков рабочей и уравнительной обмоток трансреактора, оценке чувствительности защиты.

Рекомендуемый порядок расчета:

1. Определяются первичные токи для всех сторон защищаемого трансформатора, выбираются трансформаторы тока и определяются вторичные токи в плечах защиты

2. Определяется число витков обмотки трансреактора для основной стороны. За основную сторону принимается сторона с наибольшим вторичным током в плечах защиты.

$$w_{ОСН} = \frac{100 \times k \times I_{CP*}}{I_{1ВТ\ НОМ}},$$

где

$w_{ОСН}$	- число витков обмотки трансреактора для основной стороны;
k	- коэффициент кратности шкалы; может приниматься равным 1 или 2;
I_{CP*}	- уставка по току срабатывания в долях от номинального тока; $I_{CP*} = 0,4;\ 0,5;\ 0,65;\ 0,9;\ 1,2.$
$I_{1ВТ\ НОМ}$	- вторичный номинальный ток силового трансформатора для основной стороны, А.

Значения k и I_{CP*} выбираются из условия наилучшего совпадения рассчитанного числа витков с числом витков какого-либо из отводов основной обмотки, *Табл. 13*. Результат расчета округляется до ближайшего меньшего значения.

Таблица 13

Отвод	1	2	3	4	К1
$w_{ОСН}$	12	16	20	25	30

3. Определяются числа витков трансреактора для подключения к трансформаторам тока, установленным на неосновных сторонах. Для расчета необходимо воспользоваться требованием соблюдения равенства магнитодвижущих сил обмоток:

$$I_{1ВТ\ НОМ} w_{ОСН} = I_{2ВТ\ НОМ} w_1 = I_{3ВТ\ НОМ} w_2,$$

где

$I_{2ВТ\ НОМ}$	- вторичный номинальный ток силового трансформатора для неосновной стороны I, А.
$I_{3ВТ\ НОМ}$	- вторичный номинальный ток силового трансформатора для неосновной стороны II, А.
$w_1 = w_{ОСН} + w_{ДОП1}$	- число витков для неосновной стороны I
$w_2 = w_{ОСН} + w_{ДОП2}$	- число витков для неосновной стороны II
$w_{ОСН}$	- число витков основной обмотки

$w_{доп1}$, $w_{доп2}$ - число витков дополнительных обмоток, выбираемых соответственно из Табл.14 и Табл.15

Таблица 14

Отвод	Н2	5	К2
$w_{ДОП1}$	0	1	3

Таблица 15

Отвод	Н3	6	К3
$w_{ДОП2}$	0	1	2

Рассчитанные значения витков для неосновных сторон округляются в ближайшую сторону.

3.2.6 Дифференциальная токовая защита трансформаторов на реле типа RET 316

Цифровая защита типа RET 316 фирмы АББ Реле-Чебоксары применяется:

- на электростанциях для защиты трансформаторов собственных нужд, трансформаторов и автотрансформаторах связи, блочных трансформаторов;

- в электрических сетях для защиты трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

RET 316 состоит из следующих блоков (Рис.22):

1. Аналоговый входной блок
2. Входной блок обработки
3. Центральное процессорное устройство
4. Блок ввода/вывода
5. Дополнительная плата связи и памяти
6. Материнская плата
7. Блок питания

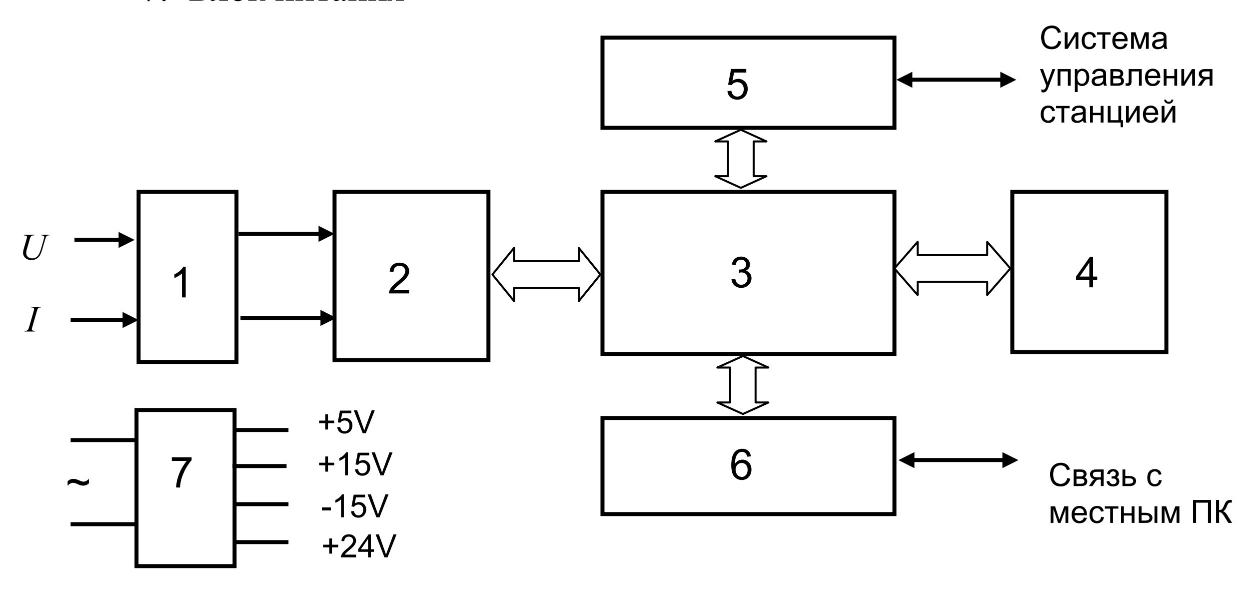


Рис.22 *Блок-схема защиты трансформатора RET 316*

В *аналоговом входном блоке 1* производится гальваническая развязка входных сигналов и их нормирование. В состав блока может входить до шести трансформаторов тока и трех трансформаторов напряжения или девяти трансформаторов тока.

Входной блок обработки 2 преобразует аналоговые сигналы в цифровые с помощью АЦП и производит цифровую фильтрацию сигналов под управлением входного процессора типа 80186. Дискретизация входных сигналов производится 12 раз за период, т.е. частота дискретизации составляет 600 Гц.

Центральное процессорное устройство 3 состоит из главного микропроцессора защиты (Intel 80186) и микропроцессора логики (Intel 8031). Основной микропроцессор получает сигналы от входного микропроцессорного устройства, реализует алгоритм защиты и передает результат вычислений микропроцессору логики. Последовательный интерфейс RS-232C, входящий в ЦПУ, позволяет настроить защиту с персонального компьютера оператора и передать информацию о происходящих событиях на ПК.

Дополнительная плата связи и памяти 5 содержит микропроцессор Intel 80186 для обеспечения связи защиты и системы управления электростанцией, часы реального времени. Плата позволяет дистанционно устанавливать параметры защиты, передавать результаты измерений тока, напряжения, мощности и т.д. оперативному персоналу станции и на регистратор отклонений.

Программное обеспечение защиты позволяет:

- отстроиться от броска тока намагничивания;
- выполнить амплитудно –фазовую коррекцию входных токов;
- получить токозависимую нелинейную характеристику срабатывания (Рис.23);
- отстроиться от апериодических составляющих и высших гармоник;
- обеспечить высокую устойчивость функционирования при внешних повреждениях и насыщении трансформаторов тока;
- обеспечить быстродействие.

Расчет защиты заключается в определении начального тока срабатывания (уставка g), отстройке функционального блока защиты от броска тока намагничивания силового трансформатора (параметр Inrush Ratio), расчете

коэффициентов выравнивания амплитуд токов плеч дифзащиты, определении точки излома характеристики срабатывания (уставка b), расчете коэффициента торможения (уставка ν) и расчете тока срабатывания дифференциальной отсечки.

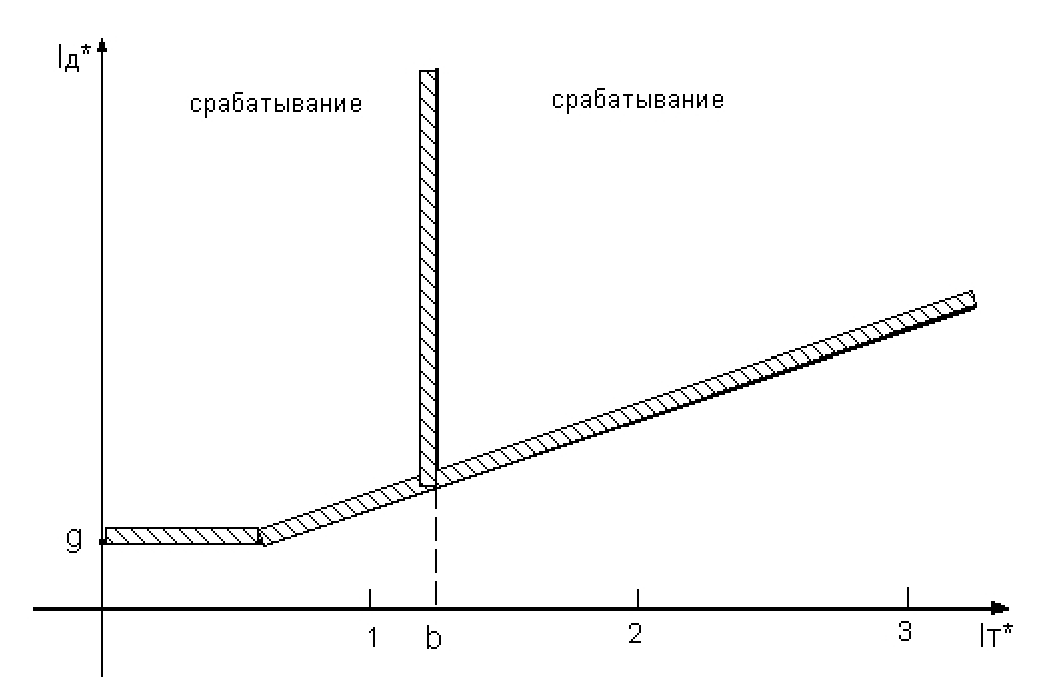


***Рис.23** Характеристика срабатывания дифференциальной защиты*

Рекомендуемый порядок расчета:

1. Рассчитываются первичные токи для сторон защищаемого трансформатора при нулевом положении РПН, выбираются трансформаторы тока. Вторичные обмотки трансформаторов тока со всех сторон соединяются в схему звезды с нулевым проводом. Возможная неодинаковость модулей и фаз токов в плечах защиты из-за разной группы соединения обмоток защищаемого трансформатора устраняется в самом реле.

2. Определяются уставки коэффициентов выравнивания токов плеч дифзащиты a_1, a_2, a_3 как отношение первичного номинального тока трансформатора тока $I_{НОМ\ ТТ}$ к номинальному току защищаемого силового трансформатора $I_{ТР}$ для каждой из сторон

$$a_1 = \frac{I_{НОМ1\ ТТ}}{I_{ТР1}},\ a_2 = \frac{I_{НОМ2\ ТТ}}{I_{ТР2}},\ a_3 = \frac{I_{НОМ3\ ТТ}}{I_{ТР3}}$$

3. Определяется начальный ток срабатывания реле по выражению

$$I_{СР*} = k_{ОТС} I_{НБ\ РАСЧ*},$$

где

$I_{СР*}$	- ток срабатывания реле в относительных единицах;
$k_{ОТС} = 1{,}1\text{-}1{,}2$	- коэффициент отстройки;
$I_{НБ\ РАСЧ*} = k_{ПЕР}\varepsilon_* + \Delta U_{РЕГ*} + \Delta f_{ВЫР*}$	- расчетный ток небаланса в о.е.;
$k_{ПЕР}$	- коэффициент, учитывающий переходный процесс: $k_{ПЕР} = 2$ - для трансформаторов мощностью до 40 МВА; $k_{ПЕР} = 2{,}5$ - для трансформаторов мощностью 63 МВА и более и автотрансформаторов; $k_{ПЕР} = 2{,}5$ - для трансформаторов связи и блочных трансформаторов электрических станций; $k_{ПЕР} = 3$ - для трансформаторов собственных нужд электрических станций;
$\varepsilon_* = 0{,}1$	- допустимая погрешность трансформаторов тока в о.е.;
$\Delta U_{РЕГ*}$	- половина диапазона регулирования напряжения трансформатора в о.е.;
$\Delta f_{ВЫР*} = 0{,}04$	- относительная погрешность выравнивания токов плеч.

Уставка выбирается из условия $g \geq I_{СР*}$. Диапазон уставок g от 0,2 до 0,5 с шагом 0,05. Типичное значение уставки можно принимать равным 0,3.

4. Рассчитывается значение коэффициента торможения

$$\gamma \geq \frac{I_{СР*}}{k_{СН.Т}}$$

где

$k_{СН.Т} = 0{,}9\text{-}1$	- коэффициент снижения тормозного тока в переходном режиме.

Уставки по торможению могут быть установленными равными значениям 0,25; 0,5. Если расчетное значение коэффициента торможения γ

окажется больше 0,5, то значение γ следует принять равным 0,5, а требуемую отстройку обеспечить за счет параметра *g,* который должен быть равным 0,5.

5. Определяется точка излома характеристики срабатывания.

Нелинейная тормозная характеристика описывается выражением

$$I_{Д*} = \gamma I_{T*},$$

где

$I_Д = \left\| \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 \right\|$	- дифференциальный ток;
$\vec{I}_1, \vec{I}_2, \vec{I}_3$	- комплексные действующие значения первых гармоник токов плеч защиты при условном положительном направлении их внутрь защищаемого объекта;
$I_T = \begin{cases} \sqrt{I'_1 I'_2 cos\,\alpha} & \text{для } cos\,\alpha \geq 0 \\ 0 & \text{для } cos\,\alpha < 0 \end{cases}$	- тормозной ток;
I'_1	- действующее значение первой гармоники наибольшего из токов плеч;
$I'_2 = \left\| I'_Д - I'_1 \right\|$	
$\alpha = \angle(I'_1; -I'_2)$	

Характеристика срабатывания защиты имеет наклон, определяемый коэффициентом торможения γ. При $I_{T*} \geq b$ (точка излома характеристики) производится переключение характеристики. Если $I'_1 \geq b$ и $I'_2 \geq b$ - защита блокируется; если $I'_1 < b$ или $I'_2 < b$ - защита переходит на наклонный участок характеристики. Параметр b может принимать следующие значения: 1,25; 1,5; 1,75; 2,0; 2,5.

Типичное значение уставки b - 1,5. При таком значении обеспечивается достаточная чувствительность к токам короткого замыкания в зоне рабочих токов.

6. Производится отстройка от броска тока намагничивания.

В режиме броска намагничивающего тока при включении силового трансформатора ток протекает только в одном плече дифференциальной защиты, тормозной ток в этом режиме равен нулю, и отстройка дифзащиты производится за счет контроля отношения второй и первой гармоник дифференциального тока (параметр Inrush Ratio). Уставка Inrush Ratio может

задаваться в пределах 6-20%. С целью создания достаточного запаса по отстройке от режима включения значение уставки рекомендуется устанавливать равным 10%.

7. Рассчитывается уставка дифференциальной отсечки.

При коротком замыкании в защищаемой зоне в случае больших токов трансформаторы тока насыщаются, их полная погрешность может возрасти до 50 процентов. Для исключения замедления реле при относительно больших кратностях токов короткого замыкания предусмотрена установка дифференциальной отсечки. Диапазон уставок отсечки в относительных единицах равен 5-15%. Выбранное значение уставки должно быть отстроено от броска тока намагничивания.

3.2.7 Дифференциальная токовая защита трансформаторов на модуле SPCD 3D53

Модуль SPCD 3D53 входит в состав реле SPAD 346 С и предназначен для выполнения продольной дифференциальной защиты двухобмоточных понижающих трансформаторов распределительных сетей мощностью 6,3-100 МВА и для защиты высоковольтных электродвигателей мощностью 4000 кВт и более. Допускается его применение на трансформаторах с расщепленной обмоткой низшего напряжения пре включении со стороны НН на сумму вторичных токов трансформаторов тока и возможности выравнивания плеч защиты. Исключение составляют резервные трансформаторы собственных нужд тепловых и атомных электростанций мощностью 63 МВА и более.

Модуль SPCD 3D53 содержит 3 дифференциальных реле. Если на стороне низшего напряжения силового трансформатора трансформаторы тока соединены по схеме неполной звезды, используются два дифференциальных реле.

Расчет уставок производится в следующем порядке:

1. Рассчитываются первичные номинальные токи силового трансформатора

$$I_{НОМ} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3}U_{НОМ}}$$

Под $U_{НОМ}$ понимается номинальное напряжение трансформатора при нулевом положении РПН.

2. Выбирается схема соединения трансформаторов тока. На стороне звезды силового трансформатора трансформаторы тока соединяются в треугольник, на стороне треугольника – в звезду или неполную звезду.

3. Выбираются коэффициенты трансформации трансформаторов тока таким образом, чтобы вторичные токи, по возможности, не превышали 5 А, и рассчитываются вторичные токи в плечах защиты.

4. Определяется требуемая амплитудная коррекция входных вторичных токов по выражению

$$a = \frac{k_{СХ} I_{НОМ\ СТ}}{n_{ТТ} I_{ВТ\ НОМ}}$$

где

a	- коэффициент выравнивания;
$k_{СХ}$	- коэффициент схемы;
$k_{СХ} = \sqrt{3}$	- при схеме соединения трансформаторов тока в треугольник;
$k_{СХ} = 1$	- при схеме соединения трансформаторов тока в звезду;
$I_{НОМ\ СТ}$	- номинальный ток силового трансформатора соответствующей стороны;
$n_{ТТ}$	- принятый коэффициент трансформации трансформатора тока;
$I_{ВТ\ НОМ}$	- вторичный номинальный ток трансформатора тока.

Диапазон коррекции вторичных токов равен 0,4-1,5.

5. Определяется начальный ток срабатывания реле по выражению

$$I_{СР*} = k_{ОТС} I_{НБ\ РАСЧ*},$$

где

$k_{ОТС} = 1,3$	- коэффициент отстройки;
$I_{НБ\ РАСЧ*} = (k_{ПЕР}\varepsilon_* + \Delta U_{РЕГ*} + \Delta f_{ВЫР*})I'_*$	- расчетный ток небаланса в о.е.;
$k_{ПЕР}$	- коэффициент, учитывающий переходный процесс: $k_{ПЕР} = 2$ - для трансформаторов, доля двигательной нагрузки которых менее 50%; $k_{ПЕР} = 2,5$ - в остальных случаях
$\varepsilon_* = 0,1$	- допустимая погрешность трансформаторов тока в о.е.;

$\Delta U_{РЕГ*}$	- половина диапазона регулирования напряжения трансформатора в о.е.;
$\Delta f_{ВЫР*} = 0{,}04$	- относительная погрешность выравнивания токов плеч;
$I'_* = 0{,}5$	- ток начала торможения в о.е.

Уставка выбирается из условия $p_* \geq I_{СР*}$. Диапазон уставок p_* от 0,05 до 0,5.

4. Рассчитывается значение коэффициента торможения S_*

$$S_{РАСЧ*} \geq \frac{k_{ОТС} I_{НБ\ РАСЧ*} I''_* - p_*}{I''_* - I'_*}$$

где

$I''_* = 2$ - расчетное значение тормозного тока.

Если $S_{РАСЧ*}$ получилось меньше 0,4, то на этом расчет заканчивается. Если получилось, что $0{,}4 \leq S_{РАСЧ*} < 0{,}5$, то следует несколько увеличить p_* с целью снижения $S_{РАСЧ*}$ до 0,4. При $S_{РАСЧ*} \geq 0{,}5$ следует принять уставку $I'' = 1{,}5$ и найти $S_{РАСЧ*}$ из выражения

$$S_* \geq 1{,}5 S_{РАСЧ*} - 0{,}5$$

Если S_* получается близким к 0,5, то следует увеличить p_* и повторить расчет по приведенным выше выражениям для $S_{РАСЧ*}$ и S_* пока не получится $0{,}4 \leq S_{РАСЧ*} < 0{,}45$. На этом расчет можно закончить и принять уставку S_*, равную 45%.

5. Из-за высокой чувствительности защиты значение коэффициента чувствительности можно не проверять.

3.2.8 Дифференциальная токовая защита трансформаторов блока комплекса ШЭ 1111

Защита блочного трансформатора, входящая в комплекс ШЭ 1111, выполняется трехрелейной и включается на токи трех фаз. Защита подключается к трансформаторам тока, встроенным во вводы обмотки высшего напряжения блочного трансформатора и трансформатора собственных нужд и к трансформаторам тока в цепи генератора.

Рекомендуемый порядок расчета:

1. Рассчитываются первичные токи для сторон защищаемого трансформатора при нулевом положении РПН, выбираются трансформаторы то-

ка. Вторичные обмотки трансформаторов тока со всех сторон соединяются в схему звезды с нулевым проводом. Возможная неодинаковость модулей и фаз токов в плечах защиты из-за разной группы соединения обмоток защищаемого трансформатора устраняется в самом реле.

2. Определяются коэффициенты амплитудно-фазовой коррекции токов в плечах дифзащиты $\dot{K}_1$, $\dot{K}_2$, $\dot{K}_3$ как отношение номинального тока защищаемого силового трансформатора $I_{ТР}$ для каждой из сторон к первичному номинальному тока трансформатора тока .

Диапазон изменения $\dot{K}_1$, $\dot{K}_2$, $\dot{K}_3$ от 0,1 до 1,0 с шагом 0,01.

3. Определяется начальный ток срабатывания реле $I_{СР.Р0}$, который определяет чувствительность защиты при малых тормозных токах и выбирается с учетом:

- погрешностей трансформаторов тока;

- тока холостого хода трансформаторов напряжения при повышенном напряжении системы;

- изменения напряжения от РПН.

Типичное значение уставки принимается 0.3.

4. Определяется точка излома характеристики срабатывания.

Типичное значение уставки В – 1,5. При таком значении обеспечивается достаточная чувствительность к токам короткого замыкания в зоне рабочих токов.

5. Рассчитывается значение коэффициента торможения K_T, определяющим недействие защиты при внешних коротких замыканиях.

$$K_T > k_{ОТС} I_{НБ} / I_T ,$$

где

$k_{ОТС} = 1{,}3$	- коэффициент отстройки;
$I_{НБ} = k_{АПЕР} \times f_i \times k_{ОДН} \times I_{МАКС}$	- расчетный ток небаланса при внешнем коротком замыкании;
$k_{АПЕР} = 2$	- коэффициент, учитывающий наличие апериодической составляющей;
$f_i = 0{,}1$	- допустимая погрешность трансформаторов тока в о.е.;
$k_{ОДН} = 0{,}5$	- коэффициент однотипности трансформаторов тока:

$I_{МАКС}$	- максимальное значение тока внешнего короткого замыкания;
I_T	- ток торможения; $I_T = \sqrt{I_1 \times I_\Sigma \times \cos\alpha}$ - сквозное короткое замыкание; $I_T = 0$ - внутреннее короткое замыкание;
$\dot{I}_1$	- ток первой обмотки трансформатора;
$\dot{I}_\Sigma$	- для двух групп трансформаторов тока ток второй обмотки трансформатора; - для трех групп трансформаторов тока геометрическая сумма токов второй и третьей обмоток трансформатора.

Диапазон уставок K_T от 0,3 до 0,7.

Типичное значение уставки – 0,5. Более высокие значения K_T принимаются в случае резко различных условий работы трансформаторов тока при внешних коротких замыканий.

6. Рассчитывается дифференциальный ток срабатывания отсечки.

Дифференциальная токовая отсечка предназначена для надежного срабатывания защиты при внутренних коротких замыканиях в случае больших токов, когда из-за насыщения трансформаторов тока их полная погрешность может возрасти до 50%.

Диапазон уставок отсечки от $6 \times I_{НОМ}$ до $12 \times I_{НОМ}$

7. Производится отстройка от броска тока намагничивания.

Бросок тока намагничивания фиксируется за счет появления второй гармоники, величина которой должна быть не менее 10% от значения основной гармоники. При обнаружении броска тока намагничивания начальный ток срабатывания принимает значение $I_{СР\,ВКЛ}$. Рекомендуемая уставка $I_{СР\,ВКЛ} = 0{,}8 I_{НОМ}$.

8.Чувствительность защиты можно не проверять.

3.3 ТОКОВАЯ ОТСЕЧКА ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Первичный ток срабатывания защиты отстраивается от максимального тока короткого замыкания на стороне низшего напряжения трансформатора:

$$I_{СЗ} \geq k_{ОТС} I_{КЗ\,МАКС},$$

где

$k_{ОТС} = 1{,}4$ - коэффициент отстройки;

$I_{КЗ\,МАКС}$ - ток трехфазного короткого замыкания в месте установки защиты при к.з. на шинах низшего напряжения трансформатора.

Чувствительность защиты определяется при металлическом двухфазном к.з. на стороне установки защиты в минимальном режиме работы системы. Минимальное значение коэффициента чувствительности допускается в пределах 2.

3.4 МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С ПУСКОМ НАПРЯЖЕНИЯ

Защита предназначен для резервирования основных защит трансформатора и защит отходящих присоединений.

Защита выполняется на реле типа РТ-40 (РСТ-13), фильтре-реле напряжения обратной последовательности типа РНФ-1М и реле минимального напряжения типа РН-54(РСН-13).

Ток срабатывания защиты выбирается:

1) по условию отстройки от номинального тока трансформатора

$$I_{СЗ} = \frac{k_{ОТС}}{k_В} I_{НОМ},$$

где

$k_{ОТС} = 1{,}2$ - коэффициент отстройки;

$k_В = 0{,}8$ - коэффициент возврата;

$I_{НОМ}$ - номинальный ток присоединения; в тех случаях, когда максимальный рабочий ток присоединения меньше номинального тока трансформатора в выражение для определения $I_{СЗ}$ следует использовать $I_{РАБ\,МАКС}$.

2) по условию согласования с защитами смежных присоединений:

- максимальной токовой защитой

$$I_{СЗ} \geq k_{ОТС} k_{ТОК} I_{СЗ\,СМ\,ПР},$$

где

$k_{ОТС} = 1{,}1$	- коэффициент отстройки;
$k_{ТОК}$	- коэффициент токораспределения;
$I_{СЗ\,СМ\,ПР}$	- ток срабатывания защиты смежного присоединения.

- дистанционной защитой

$$I_{СЗ} \geq \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}\left[\dfrac{Z_{\Sigma З}}{k'_{ТОК}} + \dfrac{Z_{СЗСМ\,ПР}}{k_{ТОК}} + \Delta Z\right]}$$

где

$Z_{\Sigma З}$	- результирующее сопротивление до места установки защиты со стороны питания;
$Z_{СЗ\,СМ\,ПР}$	- сопротивление срабатывания защиты смежного присоединения, с которой производится согласование;
ΔZ	- сопротивление от места установки рассматриваемой защиты до места установки защиты, с которой производится согласование;
$k'_{ТОК}$	- коэффициент токораспределения, равный отношению тока в месте установки защиты, к току в сопротивлении $Z_{\Sigma З}$
$k_{ТОК}$	- коэффициент токораспределения, равный отношению тока в месте установки защиты, к току в элементе, с защитой которого производится согласование.

2. Напряжение срабатывания устройства фильтр-реле напряжения обратной последовательности принимается равным

$$U_{2СЗ} = 0{,}06\, U_{НОМ}.$$

3. Первичное напряжение срабатывания минимального реле напряжения выбирается из условий:

- возврата реле после отключения внешнего к.з.

$$U_{СЗ} \leq \frac{U_{МИН}}{k_{ОТС} k_{В}};$$

- отстройки реле от напряжения самозапуска при включении заторможенных двигателей после действия АВР или АПВ

$$U_{СЗ} \leq \frac{U_{СЗАП}}{k_{ОТС}}$$

где

$U_{МИН} = (0{,}85 - 0{,}9)U_{НОМ}$	- минимально возможное рабочее напряжение;
$U_{СЗАП}$	- напряжение в месте установки защиты при самозапуске двигателя, в ориентировочных расчетах $U_{СЗАП} = 0{,}7U_{НОМ}$;
$k_{ОТС} = 1{,}2$	- коэффициент отстройки;
$k_{В} = 1{,}2$	- коэффициент возврата.

4. Чувствительность защиты определяется по выражениям :

- для токового реле

$$к_{Ч\ I} = \frac{I_{КЗ}^{(2)}}{I_{СЗ}}$$

- для минимального реле напряжения

$$к_{Ч\ U} = \frac{U_{СЗ}}{U_{КЗ}^{(2)}}$$

- для фильтр-реле напряжения обратной последовательности

$$к_{Ч\ U} = \frac{U_{23}}{U_{СЗ}}$$

где

$I_{КЗ}^{(2)}$	- ток в месте установки защиты при двухфазном к.з. в расчетной точке;
$U_{КЗ}^{(2)}$	- напряжение в месте установки защиты при двухфазном к.з. в расчетной точке;
U_{23}	- напряжение обратной последовательности в месте установки защиты при двухфазном к.з.

Значение коэффициентов чувствительности при работе защиты в режиме ближнего резервирования должно быть не менее *1.5*, в режиме резервирования защит смежных присоединений $\geq 1{,}2$

3.5 МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

Максимальная токовая защита применяется в тех случаях, когда по условиям чувствительности не требуется пуск по напряжению. Ток срабатывания защиты отстраивается от рабочего максимального тока нагрузки

$$I_{СЗ} = \frac{k_{ОТС} k_{СЗ}}{k_В} I_{РАБ\ МАКС}$$

где

$k_{ОТС} = 1,2$	- коэффициент отстройки;
$k_В = 0,8$	- коэффициент самозапуска заторможенных двигателей;
$I_{НОМ}$	- максимальный рабочий ток в месте установки защиты.

Требуемое значение коэффициента чувствительности должно быть при ближнем резервировании ≥ 1.5, при дальнем резервировании ≥ 1.2.

3.6 ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Токовая защита обратной последовательности предназначена для резервирования основных защит автотрансформатора и выполнения функций дальнего резервирования. Защита устанавливается на стороне высшего напряжения и выполняется направленной в сторону сети высшего напряжения и ненаправленной в сторону среднего напряжения. Свойство направленности реализуется при помощи фильтр-реле типа РМОП-2, ненаправленная зашита выполняется на фильтр-реле тока типа РТФ-8.

Первичный ток срабатывания защиты выбирается из условия ее несрабатывания от максимально возможного тока небаланса на выходе фильтра токов обратной последовательности в условиях реальных эксплуатационных перегрузках автотрансформатора :

$$I_{2\,СЗ} = \frac{k_{ОТС}}{k_В}(I_{2\,НБ} + I_{2\,НЕС}),$$

где

$k_{ОТС} = 1,2$	- коэффициент отстройки;
$k_В = 0,8$	- коэффициент самозапуска заторможенных двигателей;
$I_{2\,НЕС}$	- первичный ток обратной последовательности, обусловленный несимметрией системы ;
$I_{2\,НБ} = k_{НБ} I_{НАГР\ МАКС}$	- ток небаланса на выходе фильтра, приведенный к первичной стороне;
$k_{НБ} = (0,02 - 0,03)$	- коэффициент небаланса;
$I_{НАГР\ МАКС}$	- максимально возможный в условиях эксплуатации ток нагрузки автотрансформаторов.

При выборе тока срабатывания по условию отстройки от тока небаланса защита, как правило, не согласуется с резервными защитами смежных линий, поэтому в целях снижения неселективных действий следует принимать ток ее срабатывания

$$I_{2\,СЗ} = (0,1 - 0,2)I_{НОМ},$$

а также ограничивать чувствительность защиты в зоне резервирования (его значение не должно превышать *1.5*).

В случае использования защиты обратной последовательности на мощных автотрансформаторах, осуществляющих ответственную связь между системами, рекомендуется производить согласование по чувствительности рассматриваемой защиты с защитами смежных линий:

- с токовой защитой нулевой последовательности в сетях с глухозаземленной нейтралью;
- с защитой от многофазных коротких замыканий (дистанционная, максимальная токовая);
- если на смежных элементах установлена защита обратной последовательности, то согласование производится с ней , а первые два условия не учитываются.

Согласование производится с наиболее чувствительными ступенями смежных защит.

Выбор тока срабатывания по условию согласования по чувствительности производится по выражению

$$I_{2\,СР} \geq k_{ОТС} I_{2\,РАСЧ},$$

где

$k_{ОТС} = 1,1$	- коэффициент отстройки;
$I_{2\,РАСЧ}$	- ток обратной последовательности в месте установки рассматриваемой защиты, когда защита, с которой производится согласование, находится на грани срабатывания

Чувствительность защиты по току проверяется по выражению

$$k_{Ч} = \frac{I_{2\,К}}{I_{2\,СЗ}},$$

где

$I_{2\,РАСЧ}$	- ток обратной последовательности в месте установки защиты при двухфазном к.з. в конце зоны резервирования

В соответствии с ПУЭ требуемый коэффициент чувствительности должен быть не менее *1.2*.

3.7 ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА АВТОТРАНСФОМАТОРОВ ОТ ВНЕШНИХ МНОГОФАЗНЫХ КЗ

Дистанционная защита выполняет функции дальнего резервирования защиты сетей на сторонах высокого и среднего напряжений и ближнего резервирования основных защит автотрансформатора.

Защита выполняется на типовой панели типа ПЭ 2105, содержащей в качестве измерительных органов блок реле сопротивления БРЭ 2801.

Характеристика реле сопротивления первой ступени имеет вид окружности или эллипса, проходящих через начало координат или смещенных в III квадрант, *Рис. 24*.

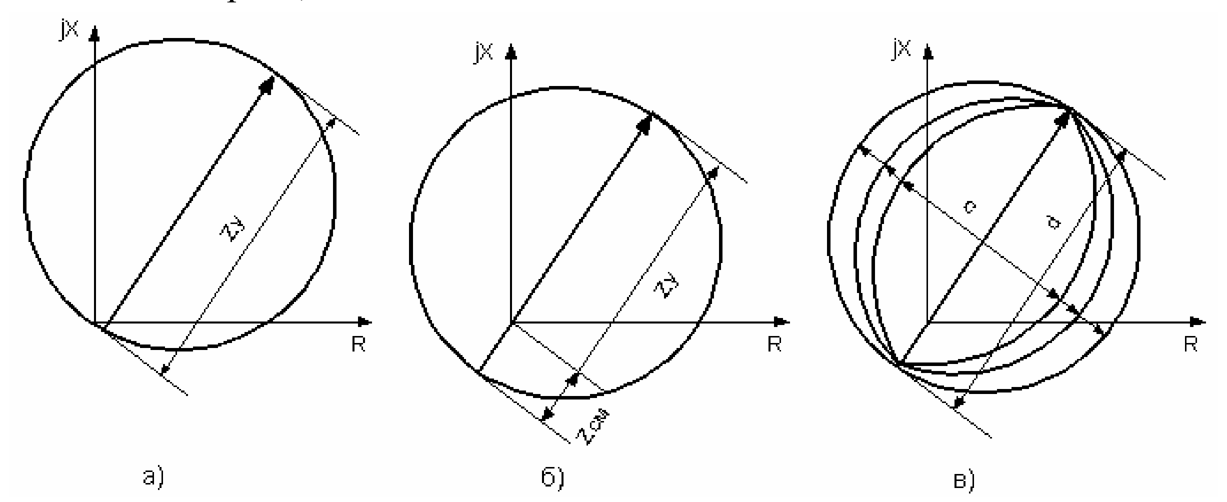


Рис.24 *Характеристика срабатывания реле сопротивления первой ступени*

Смещение характеристики в III квадрант производится для устранения мертвой зоны. Уставки смещения имеют значение *0.06, 0.12, 0.2* в долях сопротивления срабатывания при отсутствии смещения. Для улучшения отстройки реле от нагрузочных режимов круговая характеристика может быть трансформирована в эллипс, эллиптичность которой регулируется уставками $c / d = 1;\ 0.8;\ 0.65;\ 0.5$.

Характеристика реле сопротивления второй ступени представлена на *Рис.25*. Величина смещения задается параметром

$$a = Z_{CM} / Z'_{У},$$

где

$Z'_{У}$ - сопротивление уставки при отсутствии смещения.

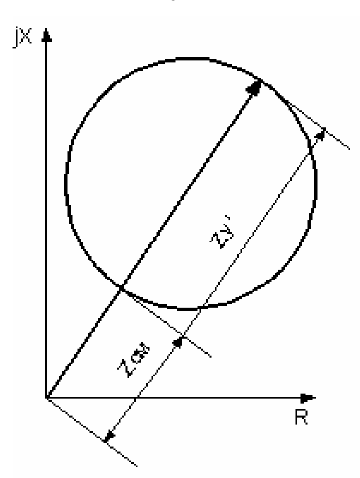


Рис.25 *Характеристика срабатывания реле сопротивления второй ступени*

В зависимости от конкретной схемы района, мощности и напряжения автотрансформатора для выполнения защиты применяют одну или две панели ПЭ 2105.

3.7.1 Использование одной панели

Панель подключается таким образом, чтобы по возможности автотрансформатор входил в зону действия защиты. В частности, первая ступень может быть направлена в сторону высшего или среднего напряжения, а вторая, соответственно, в сторону среднего или высшего напряжения. Цепи напряжения защиты подсоединяются к трансформатору напряжения, установленному на низкой стороне, *Рис.26, а.*

Сопротивление срабатывания 1 ступени при направленности характеристики в сторону ВН

$$Z^{1CT}_{C3\,AT} \le 0{,}87 Z_{AT\,BH} + 0{,}78 \frac{Z^{1CT}_{C3\,Л\,BH}}{k_{T\,AT\,BH}}.$$

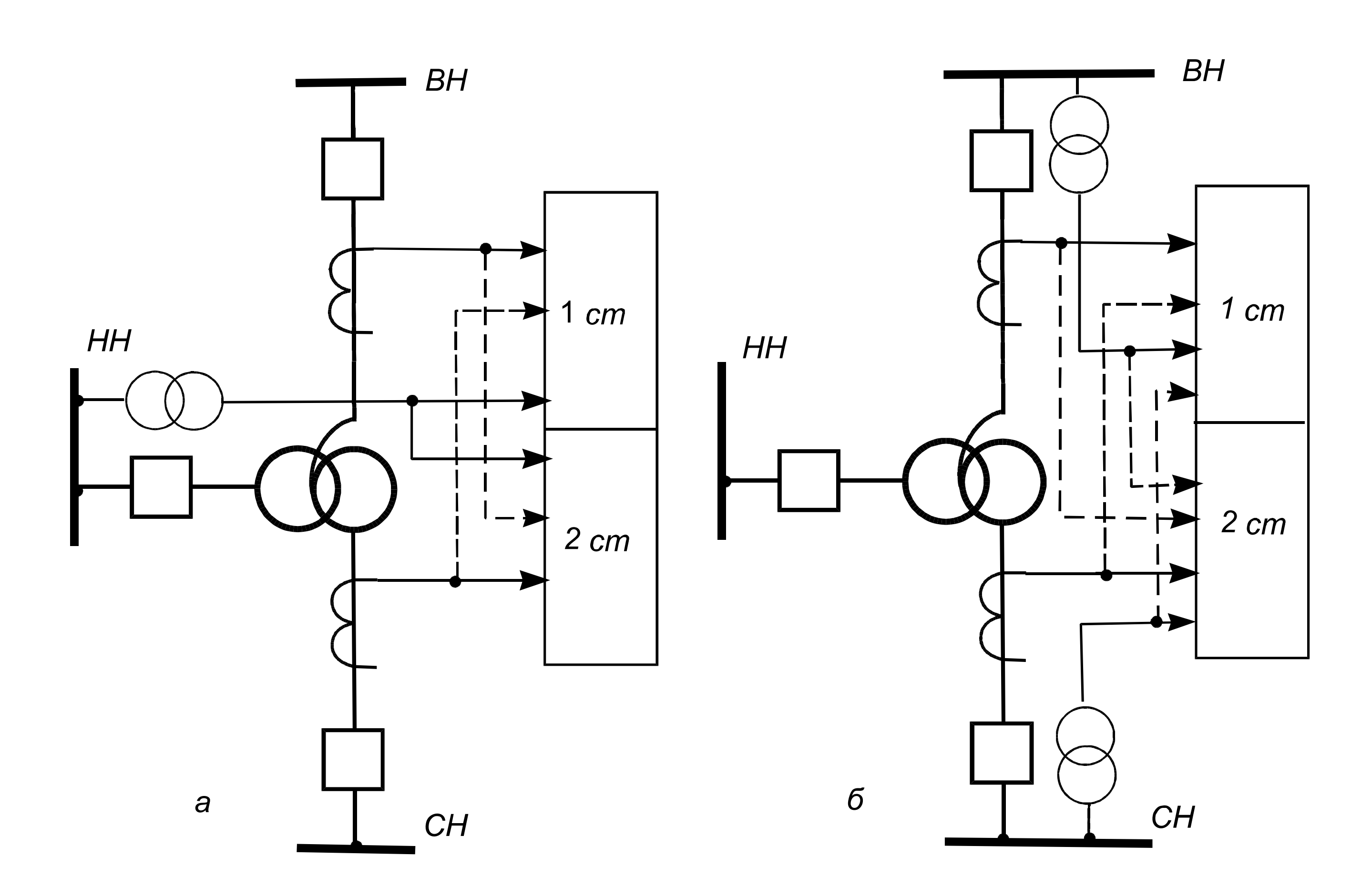


Рис.26 *Варианты подключения панели ПЭ 2105*

Сопротивление срабатывания 1 ступени при направленности характеристики в сторону СН

$$Z_{СЗ\ АТ}^{1СТ} \le 0{,}87 Z_{АТ\ СН} + 0{,}78 \frac{Z_{СЗ\ Л\ СН}^{1СТ}}{k_{Т\ АТ\ СН}},$$

где

$Z_{АТ\ ВН}, Z_{АТ\ СН}$ - минимально возможные (с учетом РПН) сопротивления обмоток рассматриваемого автотрансформатора;

$Z_{СЗ\ Л\ ВН}^{1СТ}, Z_{СЗ\ Л\ СН}^{1СТ}$ - первичные сопротивления первой ступени защиты линий соответственно высшего и среднего напряжения;

$k_{Т\ АТ\ ВН}, k_{Т\ АТ\ СН}$ - коэффициенты токораспределения, равные отношению тока в автотрансформаторе к току в линии соответственно высшего и среднего напряжений;

В тех случаях, когда подключение панели к трансформаторам напряжения, установленных на стороне НН, не обеспечивает требуемой чувствительности, следует использовать трансформаторы напряжения сторон СН и ВН, *Рис.23,б.*

Тогда

$$Z_{СЗ\ АТ}^{1СТ} \le 0{,}78 \frac{Z_{СЗ\ Л\ ВН}^{1СТ}}{k_{Т\ АТ\ ВН}},$$

или

$$Z_{СЗ\ АТ}^{1СТ} \le 0{,}78 \frac{Z_{СЗ\ Л\ СН}^{1СТ}}{k_{Т\ АТ\ СН}}.$$

Для исключения мертвой зоны на реле сопротивления устанавливают смещение характеристики в третий квадрант до *20%.*

Выдержка времени первой ступени выбирается из условия отстройки от времени действия первых ступеней резервируемых защит и времени действия УРОВ, $t_{СЗ} \approx 0.8$ *сек.*

Уставка второй ступени выбирается из условия отстройки защиты от нагрузочных режимов

$$Z_{СЗ\ АТ}^{2СТ} = \frac{Z_{НАГР}}{k_{ОТС} k_{В} \cos(\varphi_{МЧ} - \varphi_{НАГР})},$$

где

$Z_{НАГР} = \frac{U_{МИН}}{\sqrt{3} I_{НАГР\ МАКС}}$ - сопротивление нагрузки в максимальном нагрузочном режиме;

$U_{МИН} = 0{,}95U_{НОМ}$ - напряжение нагрузочного режима;

$I_{НАГР\,МАКС} = 1{,}5I_{НОМ}$ - расчетное значение максимального тока нагрузки;

$k_{ОТС} = 1{,}25$ - коэффициент отстройки;

$k_{В} = 1{,}05$ - значение коэффициента отстройки;

$\varphi_{МЧ} = 80^0$ - значение угла максимальной чувствительности

$\varphi_{НАГР}$ - угол нагрузки в расчетном режиме.

Если выбранное сопротивление срабатывания не обеспечивает требуемой чувствительности , $k_{ч} \geq 1.25$, необходимо задать смещение на величину

$$a \leq \frac{1 - \sin(\varphi_{МЧ} - \varphi_{НАГР})}{2\sin(\varphi_{МЧ} - \varphi_{НАГР})}.$$

Значение $R_{ОКР}$ может быть найдено из выражения

$$R_{ОКР} \geq \frac{Z^{2СТ}_{СЗАТ}}{2(1 - a)}.$$

3.7.2 Использование двух панелей

Две панели ПЭ - 2105 ставятся на автотрансформаторах напряжением 330 кВ и более. В этом случае на каждую из сторон высшего и низшего напряжений устанавливаются свои панели, причем, на каждой из панелей реле сопротивления направлены согласно. Напряжения на каждую панель подается от трансформатора напряжения своей ступени, *Рис. 27.*

Каждая ступень имеет три выдержки времени:

t_1 - на разделение системы шин;

t_2 - на отключение выключателя стороны, куда направлена рассматриваемая ступень;

t_3 - на отключение всего автотрансформатора.

3.8 ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

При наличии заземленной нейтрали защита выполняется в виде трех ступеней на реле типа РТ-40 или РНТ - 560.

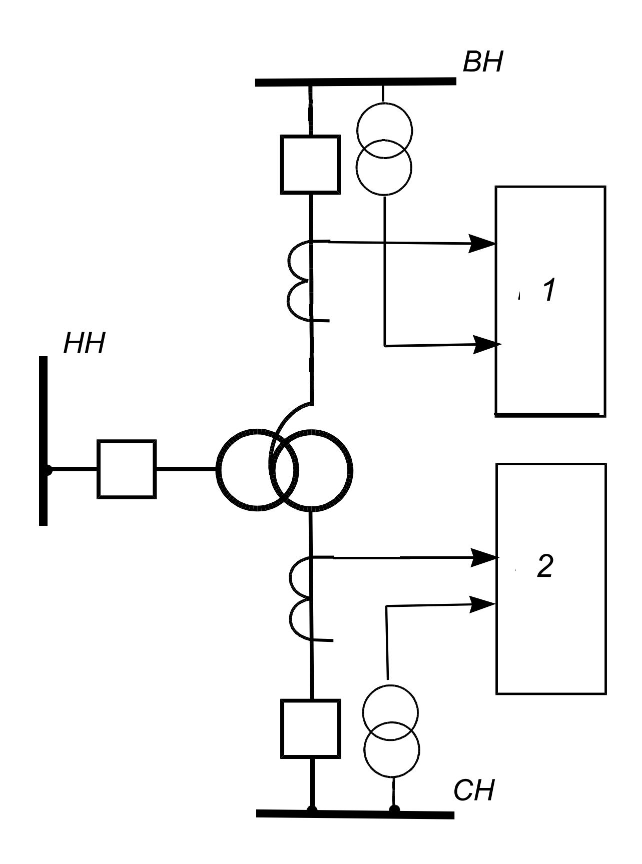


***Рис.27**. Схема подключения двух панелей ПЭ-2105.*

Первичный ток срабатывания первой и второй ступеней выбирается из двух условий:

- условия согласования по чувствительности соответственно с первой и второй ступенью защит от замыкания на землю смежных ЛЭП

$$I^{I(II)}_{0СЗ} \geq k_{ОТС} k_{ТОК} I^{I(II)}_{0СЗ\,ПРЕД},$$

где

$k_{ОТС} = 1{,}1$	- коэффициент отстройки;
$k_{ТОК}$	- коэффициент токораспределения;
$I^{I(II)}_{0СЗ\,ПРЕД}$	- ток срабатывания первой (второй) ступени защиты от замыканий на землю смежной линии

- условия отстройки от тока утроенной нулевой последовательности при внешних неполнофазных режимах

$$I^{I(II)}_{0СЗ} \geq k_{ОТС}\, 3I_{0\,НЕП}$$

где

$3I_{0\,НЕП}$	- утроенное значение тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты, при длительных внешних неполнофазных режимах;

Из рассчитанных значений выбирается большее и проверяется по условию отстройки от тока небаланса в нулевом проводе (см. ниже).

Первичный ток срабатывания третьей ступени выбирается по условию отстройки от тока небаланса в нулевом проводе в следующих режимах:

- при трехфазных коротких замыканиях на стороне низшего напряжения рассматриваемого автотрансформатора и за трансформаторами и автотрансформаторами данной и противоположных подстанций

$$I_{0\,СЗ}^{III} \geq k_{ОТС} I_{0\,НБ}$$

где

$k_{ОТС} = 1,25$	- коэффициент отстройки;
$I_{0\,НБ} = k_{НБ} I_{РАСЧ}$	- ток небаланса при внешнем трехфазном коротком замыкании;
$k_{НБ} = (0,05 - 0,1)$	- коэффициент небаланса,
$I_{РАСЧ}$	- ток в месте установки защиты при внешнем трехфазном замыкании.

- в послеаварийных нагрузочных режимах

$$I_{0\,СЗ}^{III} \geq \frac{k_{ОТС}}{k_{В}} (I_{0\,НБ} + 3I_{0\,ВН\,НС})$$

где

$k_{ОТС} = 1,25$	- коэффициент отстройки;
$3I_{0\,ВН\,НС}$	- утроенный ток нулевой последовательности, обусловленный внешней несимметрией.

Чувствительность защиты проверяется по выражению

$$k_{ч} = \frac{3I_{0КЗ}}{I_{0СЗ}}$$

Чувствительность первой и второй ступеней проверяется при замыкании на землю на шинах рассматриваемой подстанции, третья ступень проверяется по току замыкания на землю в конце смежных линий.

Требуемое значение коэффициента чувствительности - порядка *1.2.*

3.9 ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

Ток срабатывания защиты отстраивается от номинального тока трансформатора

$$I_{СР} = \frac{k_{ОТС}}{k_{В}} I_{НОМ},$$

где

$k_{ОТС} = 1,05$ - коэффициент отстройки;

3.10 КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ВВОДОВ ОБМОТКИ ВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Контроль изоляции вводов применяется для высоковольтных вводов 500 кВ автотрансформаторов при помощи блок-реле типа КИВ-500Р, который содержит сигнальный, отключающий и измерительный элементы.

Ток срабатывания сигнального органа определяется по выражению

$$I_{СИГН} = (0,05 - 0,07) I_{НОМ.ЕМК.ВВОДА} .$$

где

$I_{НОМ.ЕМК.ВВОДА}$ - номинальный емкостный ток ввода.

Выдержка времени отстраивается от максимальной выдержки времени резервных защит элементов сети высшего напряжения

Отключающий элемент вводится в работу после срабатывания реле времени сигнального элемента. Ток срабатывания определяется по выражению

$$I_{ОТКЛ} = (0,2 - 0,25) I_{НОМ.ЕМК.ВВОДА}$$

Выдержка времени отключающего элемента отстраивается от быстродействующих защит и рекомендуется в пределах $1,2 - 1,3$ с.

3.11 ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ СХЕМ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

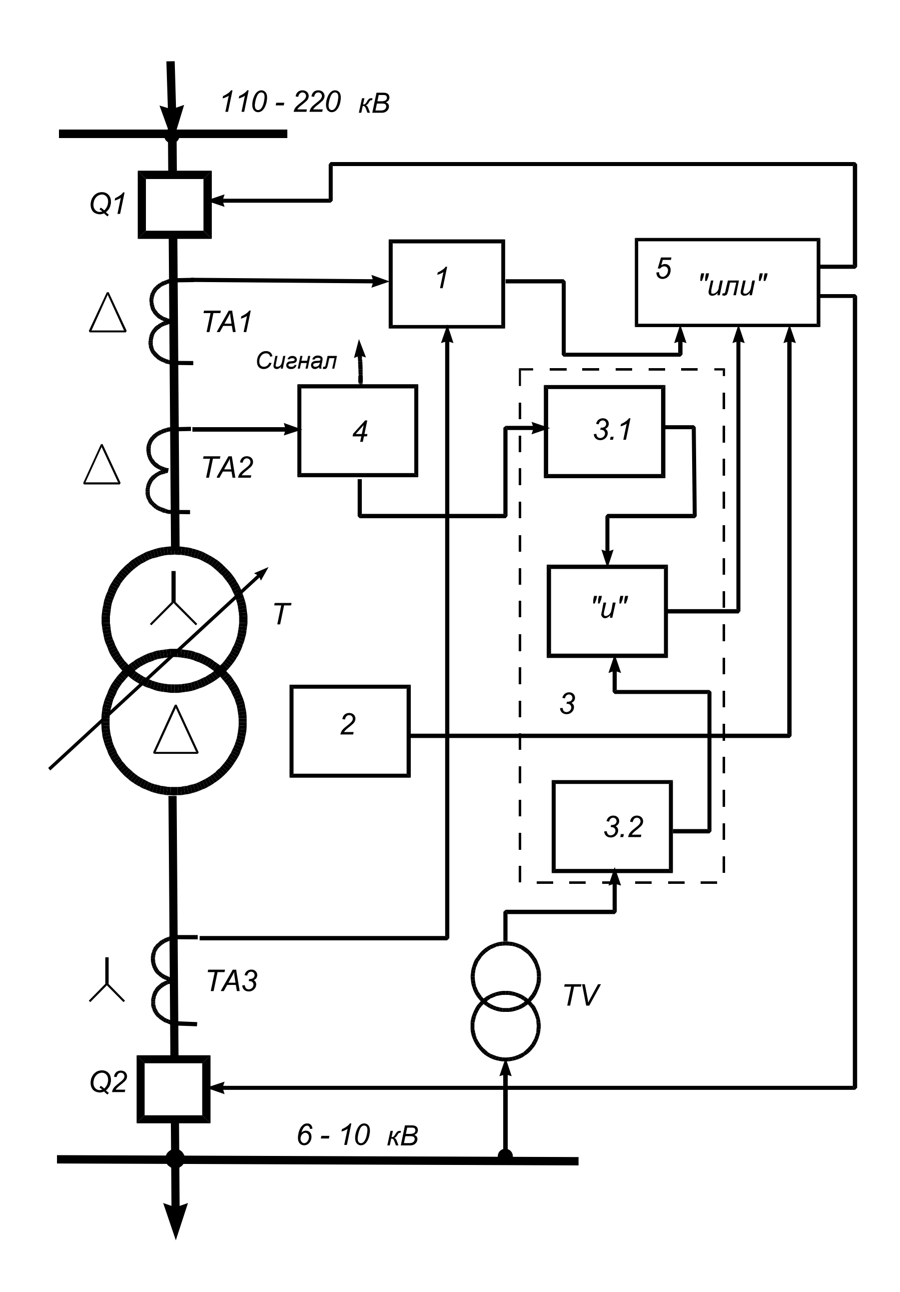


Рис.28 *Структурная схема защиты понижающего трансформатора110-220 / 6.6 - 11 кВ мощностью 6.3 мВА и более:*
1 - дифференциальная защита на реле типа РНТ-565; 2 – газовая защита; 3 - МТЗ с блокировкой по напряжению; 4 - защита от перегрузки; 5 - исполнительный орган защиты.

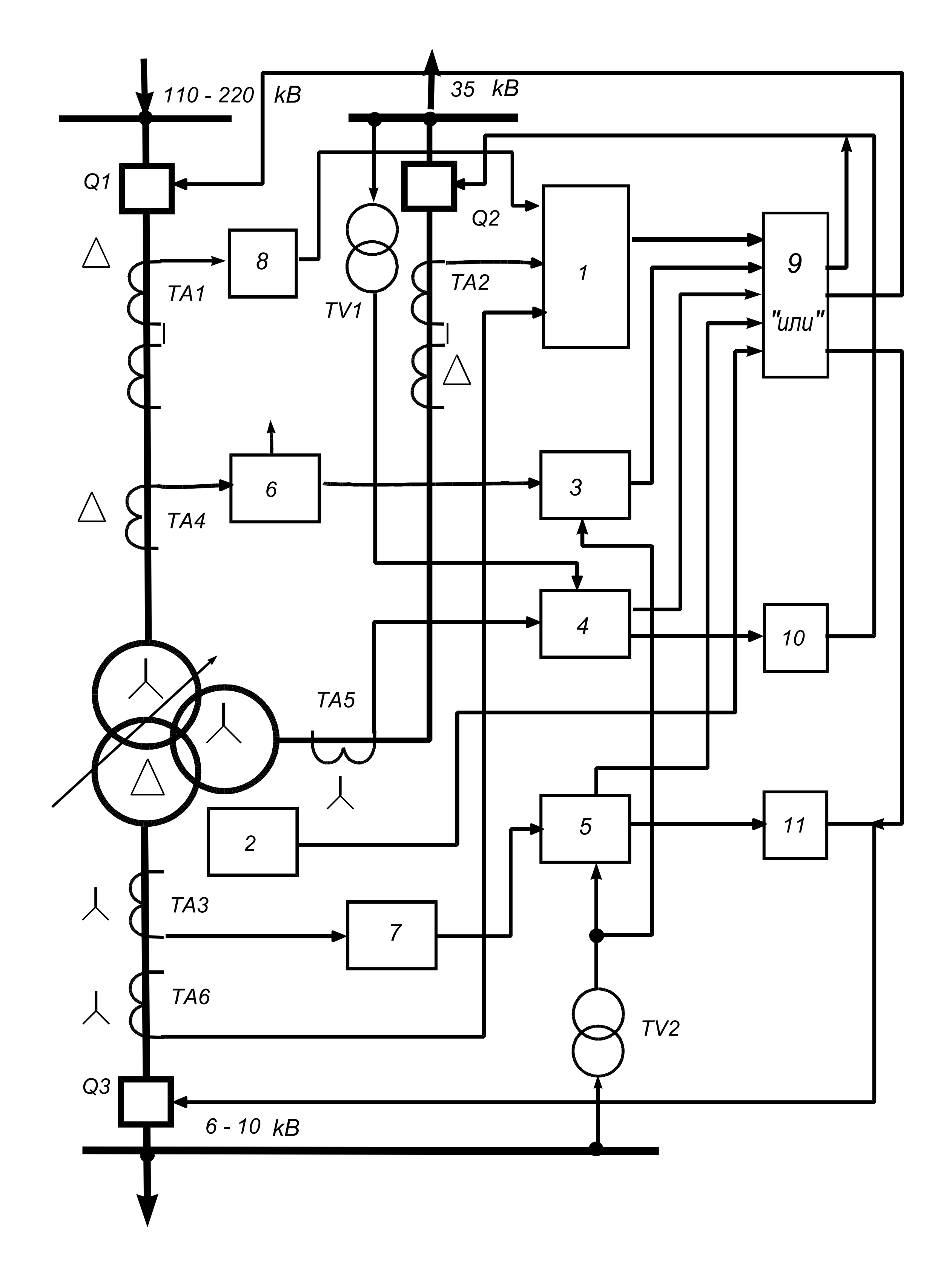


Рис.29 *Структурная схема защиты понижающего трансформатора 110-220 / 6.6 - 11 кВ с питанием со стороны высшего напряжения: 1 - дифференциальная защита на реле типа ДЗТ -11 ; 2 -газовая защита; 3, 4.5 - МТЗ с блокировкой по напряжению; 6,7 - защита от перегрузки; 8 - реле УРОВ; 9,10,11 - исполнительные элементы защиты.*

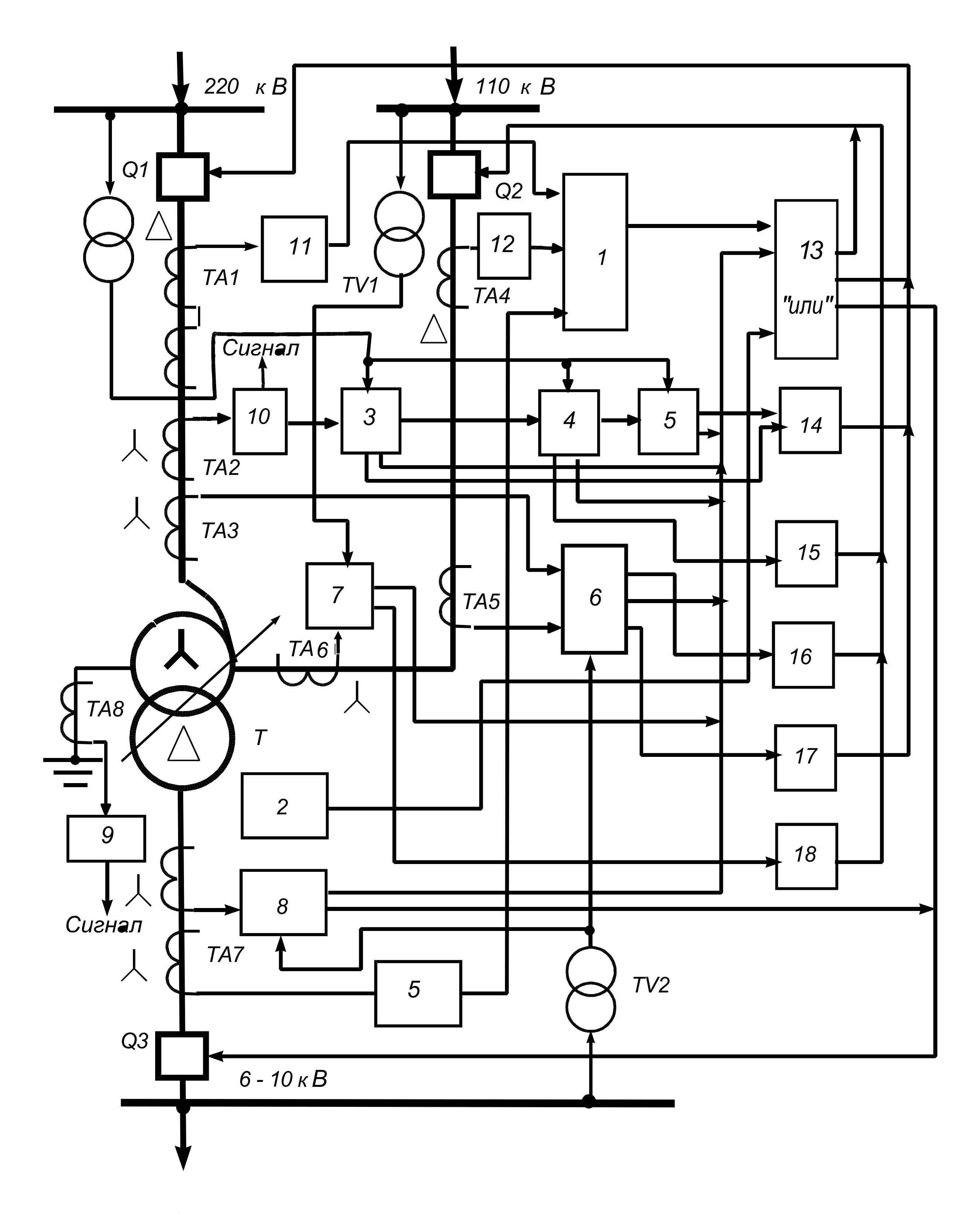


Рис.30 *Структурная схема защиты понижающего автотрансформатора 220 /110/6-10 кВ: 1 - дифференциальная защита на реле типа ДЗТ -21 ; 2 - газовая защита; 3 - токовая направленная защита обратной последовательности; 4,8 - МТЗ с блокировкой по напряжению; 5,7 - токовая направленная защита нулевой последовательности;6 - дистанционная защита типа ПЗ-5; 9,10 - защита от перегрузки; 11,12 - реле УРОВ; 13 -18- исполнительны элементы защиты.*

4

Защита электродвигателей

4.1 ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И НЕНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

На электростанциях в системе собственных нужд находят применение асинхронные и синхронные электродвигатели. Для большинства механизмов собственных нужд используются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, тип и мощность которых зависят от степени ответственности приводимых ими механизмов и от характеристики нагрузки. Синхронные электродвигатели имеют ограниченное применение и используются для привода шаровых мельниц и компрессоров.

4.1.1 Виды повреждений

На долю электродвигателей ежегодно приходится до 25-30% от общего числа повреждений электрооборудования высокого напряжения. Основным видом неисправности являются электрические повреждения, связанные с нарушением изоляции обмоток статора и ротора. Наиболее часто, в 80-95% всех случаев, неисправной оказывается обмотка статора, причем 70% повреждений приходится на фазовую и лобовые части, а остальные 25-30% составляют перекрытия и пробои изоляции в коробках выводов.

Из причин возникновения повреждений изоляции можно выделить следующие:

1) заводские дефекты; 2) неудовлетворительно выполненный ремонт электродвигателя; 3) неблагоприятные условия эксплуатации; 4) отрицательное влияние перенапряжений, связанных с коммутационными операциями и дуговыми замыканиями на землю.

Основными видами повреждений электродвигателей являются многофазные к.з. в обмотке статора, однофазные замыкания обмотки статора на землю, двойные замыкания на землю, замыкания части витков в одной фазе обмотки статора.

Междуфазные и витковые короткие замыкания встречаются довольно редко, но имеют тяжелые последствия. Дуга, возникающая в месте повреждения, обычно приводит к пожару в электродвигателе, уничтожающему значительную часть обмотки статора и выплавлению активной стали. Динамические воздействия приводят к деформации лобовых частей. По-

вреждения вблизи выводов вызывают резкое снижение напряжения на питающих шинах, что сказывается на потребителях электроэнергии.

Однофазные замыкания обмотки статора на землю являются наиболее распространенным видом повреждений. Из причин возникновения однофазных замыканий следует выделить две. Первая связана с естественным старением изоляции, длящимся до тех пор, пока под воздействием нормального рабочего напряжения не наступит пробой. Вторая - пробой в результате перенапряжений. Степень опасности замыкания на корпус оценивается по объему выплавленной стали статора и вероятностью перехода однофазного замыкания в витковое или многофазное.

Двойные замыкания на землю возникают в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью. При этом ток в месте повреждения примерно будет равен току двухфазного к.з.

Повреждения в цепях возбуждения синхронного двигателя - обрыв, замыкание на землю в одной или двух точках. При обрыве цепи возбуждения электродвигатель выходит из синхронизма и переходит в асинхронный режим. Возникновение асинхронного режима приводит к нагреву ротора и статора и для невозбужденного синхронного двигателя длительность асинхронного режима допускается от 30 сек. до нескольких минут. Замыкания на землю цепи возбуждения в одной точке не представляет опасности, однако, при замыкании другой точки цепи возбуждения образуется короткозамкнутый контур, и через место повреждения начинает протекать большой ток к.з., который может вызвать повреждение изоляции.

4.1.2 Ненормальные режимы

К ненормальным режимам следует отнести симметричные и несимметричные перегрузки, кратковременный перерыв в электроснабжении, работа при пониженном напряжении.

Симметричные перегрузки характеризуются увеличением тока, что вызывает перегрев - дополнительное превышение температуры элементов конструкции.

Основными причинами возникновения симметричных перегрузок по току являются:

1. Нарушение технологического процесса.
2. Неисправность приводимого механизма.
3. Понижение напряжения питающей сети.

4. Пуск или самозапуск электродвигателей при нагруженном приводном механизме, если электродвигатель на такой режим не рассчитан.

Дополнительный нагрев при перегрузке вызывает опасные деформации обмоток, появление трещин в изоляции, сокращается расчетный срок эксплуатации двигателя.

Поэтому для электродвигателей должна быть предусмотрена специальная защита от симметричных перегрузок с действием на сигнал или на разгрузку приводимого механизма или на отключение двигателя.

Несимметричные перегрузки вызываются неполнофазным режимом и появлением напряжения обратной последовательности в питающем напряжении. Причиной возникновения неполнофазных режимов может быть обрыв фазного провода в сети, обрывы в обмотке статора, нарушение в коробке выводов.

Стандартом на качество электроэнергии установлено допустимое значение напряжения обратной последовательности в продолжительном режиме не более 2%. Для асинхронных двигателей допустимое значение напряжения обратной последовательности составляет примерно $(2,3-4,5)\%$. Поле обратной последовательности вызывает усиленный разогрев на поверхности неявнополюсного ротора и вибрацию элементов статора и ротора

4.2 ВЫБОР И РАСЧЕТ ЗАЩИТ ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ

Для защиты от междуфазных к.з. применяют токовую отсечку и дифференциальную защиту.

В соответствии с ПУЭ токовая отсечка рекомендуется для защиты электродвигателей мощностью до *5000 кВт*, если она обладает требуемой чувствительностью к повреждениям на выводах. При недостаточной чувствительности токовой отсечки необходимо применять дифференциальную защиту. Применение дифференциальной защиты целесообразно начиная с мощности $(3500-4000)$ *кВт.*

4.2.1 Токовая отсечка

В принятых в настоящее время проектных решениях для всех электродвигателей собственных нужд напряжением *(6 - 10) кВ* токовая отсечка выполняется в двухфазном двухрелейном исполнении, что повышает ее чувствительность к междуфазным к.з.

Первичный ток срабатывания токовой отсечки, устанавливаемой на асинхронных двигателях, отстраивается от пускового тока электродвигателей $I_{ПУСК}$

$$I_{СЗ} = k_{ОТС} I_{ПУСК},$$

где

$k_{ОТС}$ - коэффициент отстройки, учитывающий погрешности реле и расчета;

$k_{ОТС} = 1,4$ - для реле типа *РТ-40;*

$k_{ОТС} = 1,8$ - для реле типа *РТ-80*;

$I_{ПУСК} = k_{П} I_{НОМ.ДВ}$ - пусковой ток электродвигателя;

$I_{НОМ.ДВ}$ - номинальный ток электродвигателя;

$k_{П}$ - кратность пускового тока, значение которого приводится в каталогах.

Соответственно, ток срабатывания реле

$$I_{СР} = k_{ОТС} k_{П} k_{СХ} I_{НОМ.ДВ} / n_{ТТ},$$

где

$k_{СХ}$ - коэффициент схемы

$n_{ТТ}$ - коэффициент трансформации трансформаторов тока.

Для синхронных двигателей, не подлежащих самозапуску, расчетным условием при выборе тока срабатывания является условие отстройки от тока внешнего трехфазного к.з.

$$I_{СЗ} = k_{ОТС} I_{К}^{(3)},$$

где

$k_{ОТС} = 1,7$ для реле типа *РТ-40;*

$k_{ОТС} = 1,8$ для реле типа *РТ-80;*

$I_{К}^{(3)} = \dfrac{(1,05 - 1,1) U_{НОМ}}{\sqrt{3} x_d''}$ - ток внешнего трехфазного к.з., протекающего через защиту, в начальный момент времени;

$U_{НОМ}$ - номинальное напряжение электродвигателя;

x_d'' - сверхпереходное сопротивление

Для синхронных двигателей, мощностью менее 2000 кВт и подлежащих самозапуску, следует дополнительно учесть режим несинхронного включения и из двух рассчитанных значений выбрать большую величину

$$I_{СЗ} = k_{ОТС} I_{НС\ ВКЛ},$$

где

$I_{НС\ ВКЛ}$ - ток несинхронного включения.

Ориентировочно, значение тока несинхронного включения при отсутствии большой асинхронной нагрузки можно определить по выражению:

$$I_{НС\ ВКЛ} = \frac{(U_C + E_{СД})}{\sqrt{3}(x_{СД} + x_C)},$$

где

U_C - напряжение системы;

$E_{СД}$ - э.д.с. синхронного двигателя;

$x_{СД} = \dfrac{x_d'' + x_q''}{2} \approx x_d''$ - сопротивление синхронного двигателя;

x_d'', x_q''. - сверхпереходные сопротивления электродвигателя по продольной и поперечной осям соответственно.

Электродвижущая сила электродвигателя $E_{СД}$ должна соответствовать режиму, непосредственно предшествующему включению и при ее определении необходимо учитывать время работы защиты. Для быстродействующих защит можно принимать $E_{СД} = (0,5 - 0,7)U_{НОМ}$; если перерыв в питании более 2 сек. - $E_{СД} = 0$. При наличии асинхронной нагрузки мощностью более **50%** мощности всех участвующих в самозапуске электродвигателей и при перерыве питания более 2 сек. можно считать $E_{СД} = 0$.

Чувствительность токовой отсечки проверяется при двухфазном к.з. на выводах электродвигателя в минимальном режиме работы системы

$$k_ч = \frac{I^{(2)}_{К\ МИН}}{I_{СЗ}} \geq 2,$$

где

$k_ч$ - коэффициент чувствительности;

$E_{СД}$ - минимальное значение тока двухфазного к.з. на выводах генератора.

4.2.2 Расчет дифференциальной защиты на реле типа РНТ-565

Параметры защиты выбираются из условия ее надежного несрабатывания в режиме пуска, самозапуска и при внешних к.з.

$$I_{СР} = k_{ОТС} I_{НБ*} I''_{МАКС} / n_{ТТ},$$

где

$k_{ОТС} = 1,10$	- коэффициент отстройки;
$I_{НБ*} = 0,37$	- для схемы соединения трансформаторов тока“неполная звезда - неполная звезда";
$I_{НБ*} = 0,30$	- для схемы соединения трансформаторов тока“ звезда - звезда";
$I_{НБ*} = 0,32$	- для схемы соединения трансформаторов тока“ звезда - треугольник";
$I_{НБ*} = 0,45$	- для схемы соединения трансформаторов тока“ неполная звезда - треугольник";
$I''_{МАКС}$	- наибольшее действующее значение периодической составляющей тока трехфазного к.з. или тока, протекающего через трансформаторы тока в режимах пуска или самозапуска;
$n_{ТТ}$	- коэффициент трансформации трансформаторов тока.

В целях отстройки от токов небаланса при переходных режимах, а также от обрыва в токовых цепях трансформаторов тока $I_{СЗ}$ рекомендуется применять не меньше величины $2I_{НОМ.ДВ}$.

$$I_{СЗ} \geq 2I_{НОМ.ДВ} .$$

Число витков рабочей обмотки реле определяется по выражению

$$w_{РАСЧ} = F_{СР}/I_{СР}$$

где

$F_{СР} = 100А$	- магнитодвижущая сила срабатывания реле РНТ - 565.

Для установки принимается ближайшее меньшее число витков.

Проверка чувствительности производится по току двухфазного к.з. на вывода х обмотки статора, при этом коэффициент чувствительности должен быть не менее двух.

4.2.3 Расчет дифференциальной защиты на реле типа ДЗТ-11

Для выполнения защиты тормозная обмотка реле подключается к трансформаторам тока, установленным со стороны нулевых выводов обмотки статора. При таком включении торможение практически не оказывает влияния на рабочую м.д.с. и таким образом обеспечивается наилучшая чувствительность защиты.

Число витков рабочей обмотки выбирается из условия надежного несрабатывания в режимах пуска, самозапуска, внешнего к.з. или несинхронного включения синхронного двигателя

$$w_P \le \frac{I_T w_T}{k_{OTC} I_{НБ\,РАСЧ}} tg\alpha$$

где

$k_{OTC} = 1{,}5$	- коэффициент отстройки, учитывающий погрешности реле;
$w_T = 24$	- число витков тормозной обмотки;
$tg\alpha = 0{,}8$	- учитывает характеристику срабатывания реле и соответствует минимальному торможению;
I_T	- тормозной ток;
$I_{НБ\,РАСЧ}$	- расчетное значение тока небаланса, определяемое с учетом неодинакового насыщения трансформаторов тока, постоянной времени и реального сопротивления дифференциальной цепи.

Расчет $I_{НБ}$ достаточно трудоемок, поэтому в практических расчетах можно пользоваться упрощенным выражением, приводящим к более грубым уставкам срабатывания, однако, приемлемым в большинстве случаев

$$w_P \le 24n.$$

Значения n для различных схем соединения трансформаторов тока, постоянной времени и полученных при этом числах витков приведены в *Табл.16.*

Таблица 16

T_a, сек.	Звезда - звезда		Неполная звезда - -неполная звезда		Неполная звезда - треугольник		Звезда - - треугольник	
	n	w_P	n	w_P	n	w_P	n	w_P
0.10	1.25	30	0.86	20	0.92	22	1.02	24
0.05	1.25	40	1.33	32	1.05	25	1.57	37
0.03	2.99	69	2.47	59	1.88	45	2.36	56

Ток срабатывания защиты после определения w_P вычисляется по формуле

$$I_{СЗ} = \frac{F_{СР} n_{TT}}{w_P},$$

где

$F_{CP} = 100A$ - магнитодвижущая сила срабатывания реле типа ДЗТ-11 при отсутствии торможения.

4.3 ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗОК

Защита от перегрузки устанавливается на электродвигателях собственных нужд, которые могут подвергаться перегрузке по технологическим причинам и для электродвигателей с особо тяжелыми условиями пуска и самозапуска с длительностью прямого пуска от 20 секунд и более.

В ПУЭ установка защиты предусматривается в одной фазе. Как правило, для электродвигателей собственных нужд защиты выполняются с независимой характеристикой срабатывания, отстроенной от пусковых режимов. Защита от перегрузки выполняется с действием на отключение при возможности неуспешного пуска, невозможности разгрузки без останова двигателя, отсутствии постоянного дежурного персонала. При возможности автоматической разгрузки защиты выполняются с двумя выдержками времени, с меньшей - на разгрузку механизма, с большей - на отключение. В остальных предусматривается действие на сигнал.

Ток срабатывания защиты выбирается по условию отстройки от номинального тока электродвигателей

$$I_{C3} = \frac{k_{OTC}}{k_B} I_{HOM\ ДВ},$$

где

$k_{OTC} = 1,2$ - коэффициент отстройки;

$k_B = 0,8$ - коэффициент возврата.

Ток срабатывания реле

$$I_{CP} = \frac{k_{CX} I_{C3}}{n_{TT}} = \frac{k_{OTC} k_{CX} I_{HOM\ ДВ}}{k_B n_{TT}},$$

где

k_{CX} - коэффициент схемы;

$k_{CX} = 1$ - при включении реле на фазные токи;

$k_{CX} = \sqrt{3}$ - при включении реле на разность фазных токов.

Чувствительность защиты от перегрузки не проверяется, поскольку она не предназначена для действия при к.з.

Выдержка времени выбирается из условия надежного несрабатывания при пуске или самозапуске двигателей по выражению

$$t_{СЗ} \geq k_{ОТС} t_{П},$$

где

$k_{ОТС} = 1,2 - 1,3$ - коэффициент отстройки;

$t_{П}$ - время пуска электродвигателей.

4.4 ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

В соответствии с ПУЭ защита от однофазных замыканий в обмотке статора предусматривается для электродвигателей мощностью менее *2000 кВт,* если ток замыкания на землю превышает *10 А,* а для электродвигателей мощностью более *2000 кВт* - при токе замыкания на землю равном или более *5 А*.

Такое решение, бывшее до недавнего времени типовым, приводило к тому, как показал опыт эксплуатации, что электродвигатели мощностью до *2000 кВт* в сетях с малыми токами замыкания на землю оказывались практически незащищенными ни от однофазных, ни от двойных замыканий на землю. Поэтому в качестве критерия в настоящее время принимается значение суммарного емкостного тока, равное *5 А*.

Таким образом, при $I_{C\Sigma} \geq 5A$ защита от однофазных замыканий на землю в обмотке статора необходима, а при токе $I_{C\Sigma} < 5A$ - желательна.

Серийно проектируемая защита выполняется на основе токового реле типа РТЗ - 51, подключенного к фильтру токов нулевой последовательности. В качестве фильтра нулевой последовательности используются кабельные трансформаторы тока типа ТЗЛ, ТЗЛМ, ТЗРЛ. При количестве кабелей в линии от четырех и более следует применять трансформаторы нулевой последовательности с подмагничиванием.

Первичный ток срабатывания защиты, выполняемый на трансформаторах нулевой последовательности без подмагничивания, выбирается из условия отстройки защиты от броска емкостного тока при внешнем замыкании на землю

$$I_{СЗ} \geq k_{ОТС} k_{БР} I_{С},$$

где

$k_{ОТС} = 1,3$ - коэффициент отстройки;

$k_{БР} = 2,5 - 3,0$ - коэффициент, учитывающий бросок собственного тока;

$I_{С}$ - собственный емкостный ток присоединения.

Емкостный ток присоединения может быть определен по выражению

$$I_C = \frac{UL}{n} k_{НАГР},$$

где

U - линейное напряжение, кВ;

$k_{БР} = 2,5 - 3,0$ - коэффициент, учитывающий бросок собственного тока;

L - длина кабеля, км;

$n = 10$ - при сечении кабеля до 50 мм^2;

$n = 6 - 8$ - при больших сечениях;

$k_{НАГР} = 1,15 - 1,30$ - коэффициент, учитывающий влияние нагрузки.

4.5 ЗАЩИТА ОТ ПОТЕРИ ПИТАНИЯ

Защита от потери питания устанавливается для предотвращения повреждения электродвигателей, затормозившихся в результате кратковременного или длительного снижения напряжения, при восстановлении питания, а также для обеспечения требований техники безопасности и условий технологического процесса. Защита выполняется групповой для каждой секции шин.

В зависимости от требований по быстродействию и от соотношения числа синхронных и асинхронных электродвигателей, присоединенных к одной секции шин, защиты подразделяются на две группы:

- защита минимального напряжения;
- защита минимального напряжения и минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности.

Для правильного выбора типа защиты от потери питания все электродвигатели целесообразно разделить на две группы по степени ответственности каждого механизма, проанализировать режимы, приводящие к снижению или перерыву питания, оценить возможность самозапуска.

А. Защита минимального напряжения, как правило, выполняется двухступенчатой.

Первая ступень предназначена для ускорения и повышения эффективности самозапуска ответственных электродвигателей, а также предупреждения несинхронного включения синхронных двигателей в сеть. Обычно напряжение срабатывания первой степени принимается равным $U^1_{СЗ} \approx 0,7U_{НОМ}$, а время срабатывания $t^1 = 0,5$ *сек*.

Напряжение срабатывания второй ступени $U_{СЗ}^{2} \approx 0,5U_{НОМ}$, а время срабатывания $t^{2} = (5 - 10)$ *сек*.

Б. Защита минимального напряжения и минимальной частоты с блокировкой по направлению мощности предусматривается, если к сокращению времени перерыва питания предъявляются высокие требования. Частота срабатывания минимального реле частоты выбирается из условия отстройки от наименьшего возможного в нормальном режиме значения частоты в энергосистеме, примерно $(48,5 - 49)$ *Гц*. Выдержка времени защиты выбирается из условия несрабатывания при кратковременных снижениях частоты в случае к.з., $t \geq 0,5$ *сек*. Реле направления мощности в схеме применяется для согласования действия защит и АЧР.

4.6 СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

4.6.1 Схема защиты асинхронного двигателя мощностью до 5000 кВт с независимой выдержкой времени при перегрузке

Схема защиты асинхронного двигателя, используемого для привода неответственного механизма и требующего отключения при однофазных замыканиях на землю, приведена на *Рис.31*. Защита включает токовую отсечку - ***kA1, kA2*;** защиту от перегрузки - ***kA3, kT*;** защиту от замыканий на землю - ***kA4*.**

В отличие от других электродвигателей , подверженных перегрузке, защита от перегрузки шахтной мельницы выполняется двухступенчатой. Первая ступень предназначена для разгрузки мельницы при кратковременной перегрузке. Выполняется с помощью реле тока ***kA3*** и реле времени ***kT1*** и действует с выдержкой времени на отключение электродвигателя питателя сырого угля. Если после отключения питателя сырого угля перегрузка не устраняется, срабатывает вторая ступень защиты, выполненная на реле тока ***kA4*** и реле времени ***kT2*,** и действует на отключение выключателя ***Q*.**

Токовая отсечка устанавливается в двух фазах - реле ***kA1*** и ***kA2*.**

Токовая защита нулевой последовательности выполнена на реле тока ***kA5*** , присоединенного к ТЗЛМ.

В схеме предусмотрено отключение питателя сырого угля от первой ступени защиты минимального напряжения, а также отключение самого элек-

тродвигателя шахтной мельницы от второй ступени защиты минимального напряжения при невозможности его самозапуска

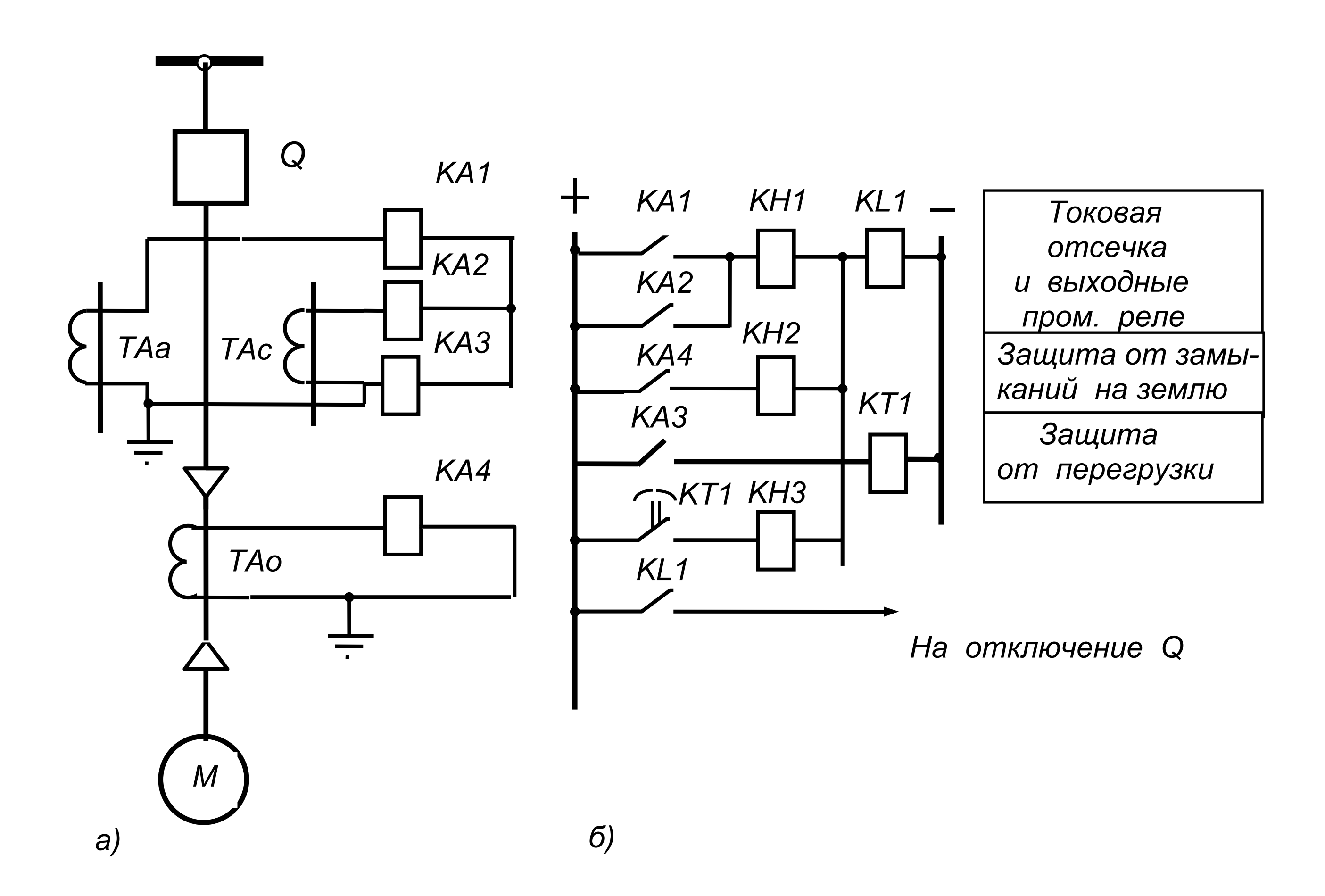


Рис.31 *Схема защиты асинхронного электродвигателя мощностью до 5000 кВА с независимой выдержкой времени при перегрузке: а) поясняющая схема; б) схема цепей постоянного тока. КА1 - КА3 - реле тока типа РТ – 40; КА4 - реле тока типа РТЗ - 51; КТ1 - реле времени типа ВЛ - 34; KL1 - промежуточное реле типа РП - 23; КН1 - КН4 - указательные реле.*

4.6.2 Схема защиты асинхронного электродвигателя шахтной мельницы (Рис.32)

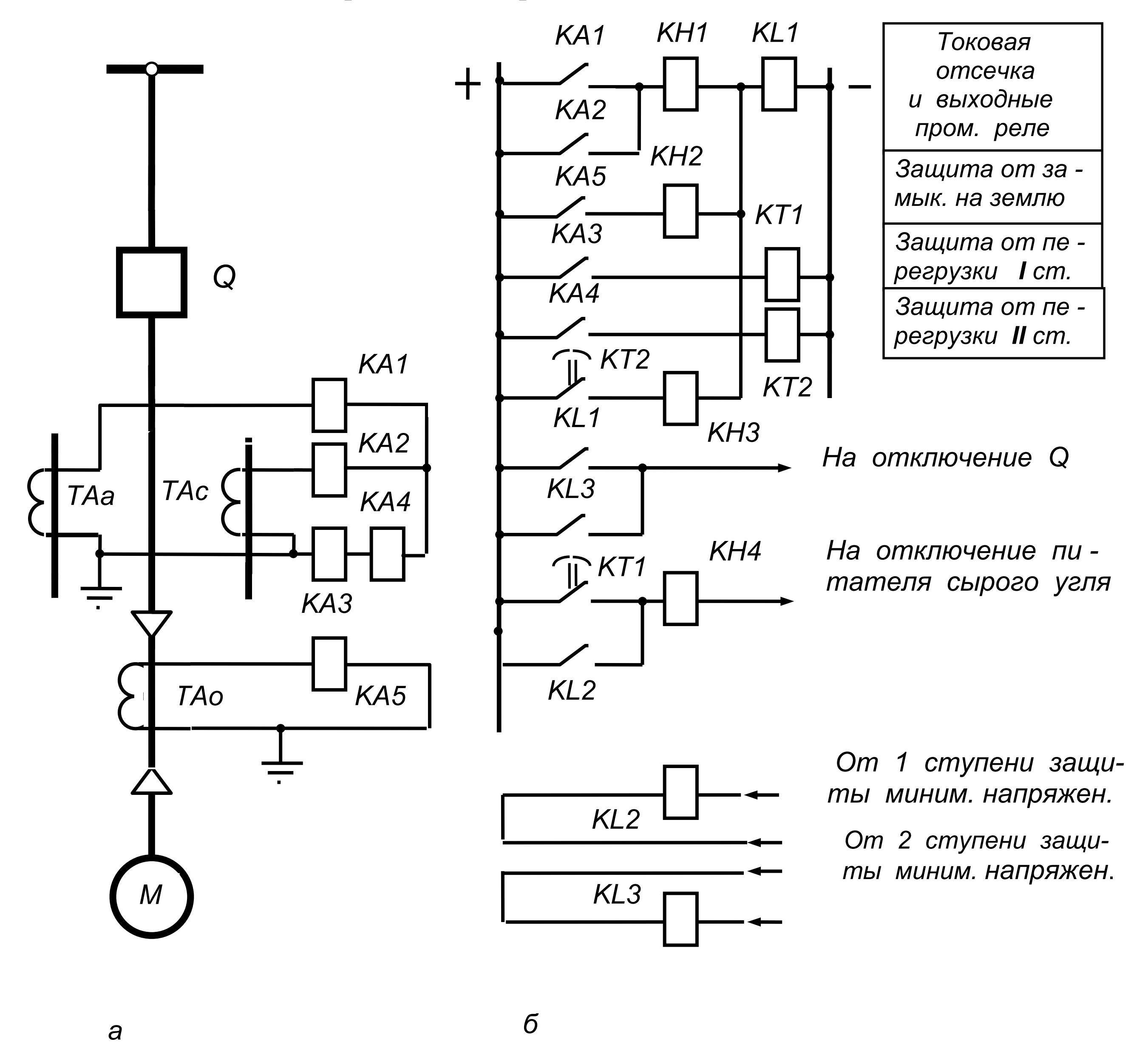


Рис.32 Схема защиты асинхронного электродвигателя шахтной мельницы: а) поясняющая схема; б) схема цепей постоянного тока.
KA1 - KA4 - реле тока типа РТ - 40; KA5 - реле тока типа РТЗ – 51; KT1 - реле времени ЭВ – 144; KT2 - реле времени типа ВЛ - 34; KL1 - KL3 - промежуточное реле типа РП - 23; KH1 - KH4 - указательные реле.

4.6.3 Схема защиты электродвигателя питательного насоса мощностью 5000 кВт и более (Рис.33)

Защита имеет двухфазное двухрелейное исполнение с применением реле тока с насыщающимися трансформаторами тока типа РНТ - 565. В нулевых выводах электродвигателя установлены 2 группы трансформаторов

тока для увеличения допустимой нагрузки. Для защиты от замыканий на землю используется реле типа РТЗ - 51.

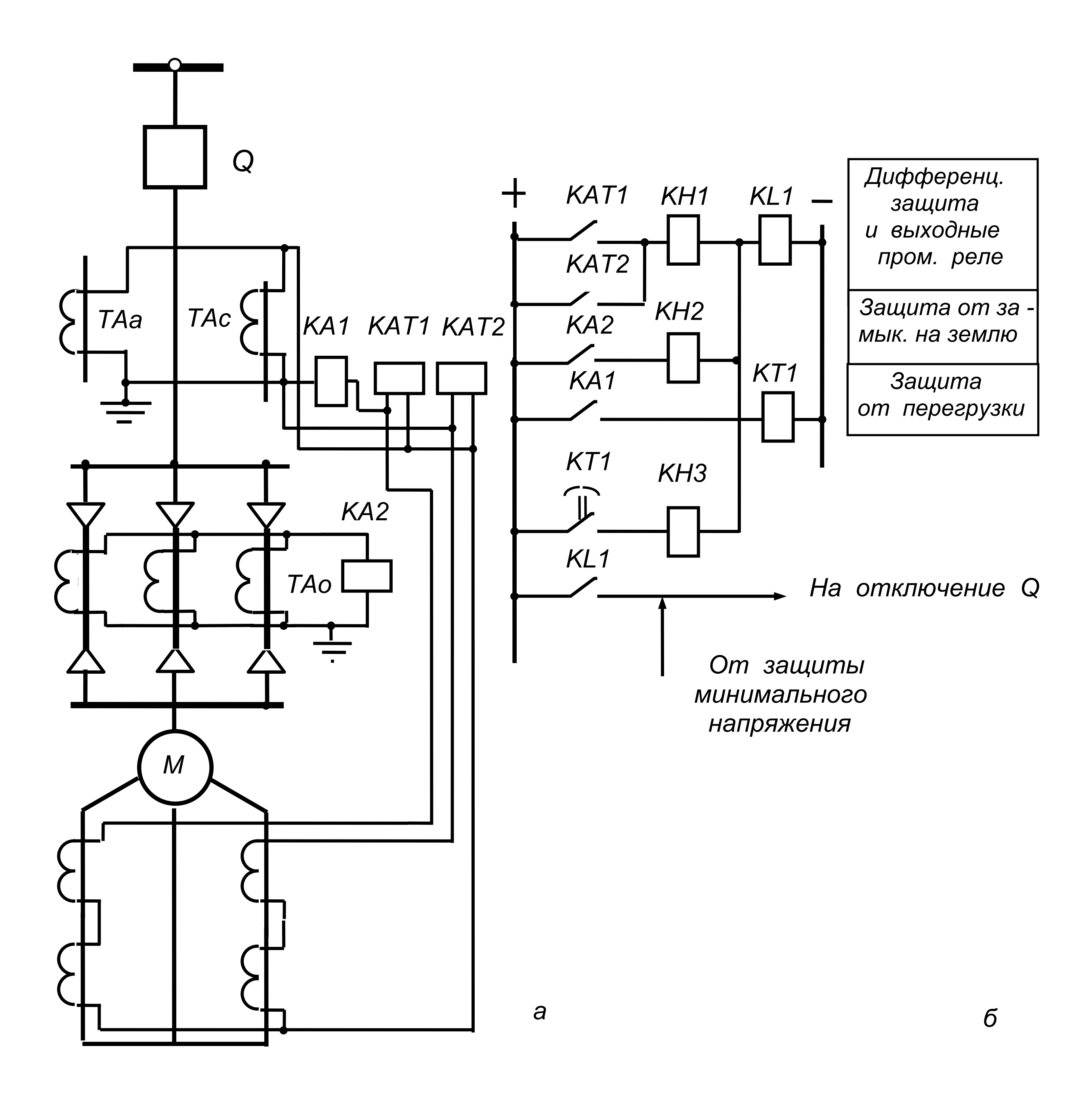


Рис.33 *Схема защиты электродвигателя с дифференциальным реле типа РНТ-565: а) поясняющая схема; б) схема цепей постоянного тока. КАТ1 - КАТ2 - реле типа РНТ - 565; КА1 - реле тока типа РТ - 40; КА2 - реле тока типа РТЗ - 51; КТ1 - реле времени типа ВЛ - 34; KL1 - промежуточное реле типа РП - 23.*

5

Защита сборных шин

5.1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

К основным причинам замыкания на шинах относятся: ошибочные действия оперативного персонала; перекрытия изоляторов при загрязнении, гололеде, грозах; поломки изоляторов разъединителей при операциях с ними и т.д. Хотя вероятность повреждения на шинах относительно невелика, их несвоевременная ликвидация может привести к тяжелой системной аварии. В частности, короткие замыкания на шинах могут вызвать:

значительное понижение напряжения в энергосистеме;

повреждения и выход из строя генераторов и трансформаторов в неповрежденной части энергосистемы;

потерю устойчивости энергосистемы.

Поэтому при выполнении релейной защиты требование быстродействия является одним из определяющих.

Защита шин выполняется в основном в основном с помощью специальных быстродействующих защит с относительной или абсолютной селективностью: токовые, токовые с блокировкой по току и направлению мощности в присоединениях, направленные, дистанционные, дифференциальные. В силу ряда недостатков, присущих защитам с относительной селективностью, наиболее эффективным для шин является дифференциальный принцип, позволяющий отключить повреждение без замедления.

Дифференциальные защиты шин подразделяются на дифференциальные токовые, дифференциальные токовые с торможением, дифференциально-фазные.

В соответствии с директивными материалами защиты шин должны реагировать:

в сетях с глухозаземленной нейтралью на все виды междуфазных и однофазных замыканий;

в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью коротких замыканий между фазами и двойных замыканий на землю.

В зону действия защиты шин обычно входят собственно шины, выключатели, шинные разъединители, трансформаторы напряжения, разрядники.

При проектировании и разработке необходимо учесть следующее:

1. Защиты шин подстанций в сетях 110 кВ и выше выполняются в трехфазном трехрелейном исполнении, в сетях 35 кВ – в двухфазном двухсистемном исполнении.

2. При разработке защит шин следует предусматривать возможность их использования при наличии трансформаторов тока с неодинаковыми коэффициентами трансформации

3. Выключатели присоединений должны входить в зону действия защиты шин.

4. Цепи трансформаторов тока всех присоединений, дифференциальные контуры защиты, цепи переключений должны иметь испытательные блоки.

5.2 РАСЧЕТ УСТАВОК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

Ток срабатывания защиты выбирается из двух условий:

1. Защита не должна срабатывать от тока нагрузки наиболее загруженного присоединения в случае обрыва токовых цепей трансформаторов тока

$$I_{СЗ} = k_Н I_{НАГР\ МАКС},$$

где

$k_Н = 1,1 - 1,2$	- коэффициент надежности

2. Защита должна быть отстроена от тока небаланса, протекающего через защиту в режиме внешнего короткого замыкания

$$I_{СЗ} = k_Н k_А \varepsilon I_{К\ ВН\ МАКС},$$

где

$k_Н = 1,5$	- коэффициент надежности;
$k_А = 1$	- коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей тока короткого замыкания в переходном режиме;
$\varepsilon = 0,1$	- допустимая погрешность трансформаторов тока;
$I_{К\ ВН\ МАКС}$	- максимальное значение тока внешнего короткого замыкания

Из двух рассчитанных значений выбирается большее.

Коэффициент чувствительности защиты определяется по выражению

$$k_Ч = I_{К\ МИН}/I_{СЗ} \geq 2,$$

где

$I_{К\ МИН}$ - минимальное значение тока внутреннего короткого замыкания

Расчетное число витков $w_{РАСЧ}$ реле типа РНТ-565 определяется по выражению

$$w_{РАСЧ} = F_{СР}\frac{n_{ТТ}}{I_{СЗ}},$$

где

$F_{СР} = 100\ Авитк$ - магнитодвижущая сила срабатывания реле;

$n_{ТТ}$ - коэффициент трансформации трансформаторов тока

Округление расчетного числа витков производится в ближайшую меньшую сторону.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Правила** устройства электротехнических установок**.** Шестое излда-ние,переработанное и дополненное, с изменениями. М.: 2002.

2. Руководящие указания по релейной защите. Вып.13А. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов. Схемы..М.: Энер-гоатомиздат, 1985. 112 с.

3. Руководящие указания по релейной защите. Вып.13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов. Расчеты..М.: Энергоатомиздат, 1985. 96 с.

4. Электротехнический справочник. В 3 т. Т.3. В 2 Кн. Кн.1 Производство и распределение электрической энергии (Под общей ред. профессоров МЭИ: И.Н.Орлова и др.) 7-е изд.: испр. и доп М.: Энергатомиздат, 1988. 880 с.

5. Руководящие указания по релейной защите. Вып.11. Расчеты токов ко-роткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики.М.: Энергтия, 1979. 152с.

6. Руководящие указания по релейной защите. Защита генераторов, рабо-тающих на сборные шины. М.: Госэнергоиздат, 1961, 68с.

7. Федосеев А.М.. Релейная защита электрических систем. М., Энергия, 1976, 559с.

8. Вавин В.Н. Релейная защита блоков турбогенератор-трансформатор. М.: Энергоиздат, 1982, 255с.

9. Беркович М.А. и др. Основы техники релейной защиты. М.: Энерго-атомиздат, 1984. 376с.

10. Корогодский В.Н. и др. Релейная защита электродвигателей напряже-нием выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987, 248 с.

11. Копьев В.Н. Релейная защита. Принципы выполнения и применения. Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. Томск, Изд. ТПУ**,** 2001.– 132с,